



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

CORRECCIONES DE RETARDOS IONOSFÉRICOS EN RADIO SEÑALES DE OBJETOS CELESTES

USO DE PROGRAMACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL TEC Y DEL SOFTWARE CASA PARA EL TRATAMIENTO DE DATOS DE TRES ESTACIONES GPS

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE FÍSICO**

ARIEL ANTONIO MEZA CHICO

ariel.meza@epn.edu.ec

DIRECTOR: ERICSON DANIEL LÓPEZ IZURIETA, PH.D.

ericsson.lopez@epn.edu.ec

DMQ, AGOSTO 2023

CERTIFICACIONES

Yo, ARIEL ANTONIO MEZA CHICO, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Ariel Antonio Meza Chico

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Ariel Antonio Meza Chico, bajo mi supervisión.

Ericson Daniel López Izurieta, Ph.D.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, es (son) público(s) y estará(n) a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Ariel Antonio Meza Chico

Ericson Daniel López Izurieta, Ph.D.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que han formado parte de este proceso, a todos quienes me han apoyado de una manera u otra. Me gustaría agradecer a mi tutor, el Ph.D. Ericson López por hacer posible este proyecto, a mis padres y a mis abuelos que han sido un apoyo incondicional, a mi hermano, a Victoria, a Leonel y Bryan quienes han jugado un papel importante en el desarrollo de este proyecto de distintas maneras.

Dedicatoria

A mi familia.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia el Contenido Total de Electrones (TEC) de la ionósfera sobre el Ecuador y su evolución en el tiempo. El TEC es un parámetro que sirve para el estudio y caracterización de la ionosfera. En esta capa se hallan electrones o iones que son producto principalmente de la radiación solar que interactúa con las moléculas ionosféricas ionizándolas. Estos electrones interactúan, a su vez, con ondas electromagnéticas que pueden provenir de cuerpos celestes o satélites, generando de este modo perturbaciones en las señales. Estas perturbaciones se conocen como retardos ionosféricos.

En el tratamiento y estudio de los datos se hallaron algunos periodos; los esperados como los periodos diarios producto de las horas de exposición solar y la temperatura atmosférica, junto con otros entre los que destaca uno de alrededor de 170 días. Para esto, se recopilaron datos durante el período comprendido entre 2018 y 2022, datos provenientes de tres estaciones Global Position System (GPS) ubicadas en Ecuador (RIOP, MAEC y TPEC). Estos datos fueron sometidos a múltiples análisis con el fin de procesarlos adecuadamente.

Además, se empleó el TEC para llevar a cabo ajustes y correcciones en los datos de señales de radio provenientes de objetos celestes, utilizando el software NRAO CASA. Esto permitió generar imágenes que representen cómo se observaría un cuerpo celeste desde el Ecuador antes de la purificación y calibración de la señal.

Palabras clave: TEC, Electrones, Ionósfera, CASA, Periodo, Calibración.

ABSTRACT

The present work focuses on the study of TEC (Total Electron Content) and its temporal evolution. TEC serves as a parameter for the study and characterization of the ionosphere, where electrons or ions are found in this layer, primarily resulting from solar radiation that interacts with ionospheric molecules, ionizing them. These electrons, in turn, interact with electromagnetic waves that can originate from celestial bodies or satellites, thus generating disturbances in the signals; these disturbances are known as ionospheric delays.

In the data analysis process, several expected periods were identified, including daily cycles due to solar exposure hours and atmospheric temperature, alongside others, with one period of around 170 days standing out. To achieve this, data were collected during the period from 2018 to 2022 from three GPS stations located in Ecuador (RIOP, MAEC, and TPEC). These data underwent multiple analyses to be adequately processed.

Furthermore, TEC was employed to perform adjustments and corrections on radio signal data originating from celestial objects, utilizing NRAO CASA software. This facilitated the generation of images depicting how a celestial body would appear from Ecuador prior to signal purification and calibration.

Keywords: TEC, Electrons, Ionosphere, CASA, Period, Calibration.

Índice general

1. Descripción del componente desarrollado	1
1.1. Definición del problema	1
1.2. Objetivo general	2
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Alcance	3
1.5. Marco teórico	4
1.5.1. Estructura de la ionosfera	4
1.5.2. Interacción de señales de radiofrecuencias con electrones ionosféricos en la zona ecuatorial	5
1.5.3. Sistema global de posicionamiento satelital (GNSS)	7
2. Metodología	11
2.1. Recopilación y visualización de datos	11
2.1.1. Cálculo del TEC	11
2.2. Recopilación, análisis y tratamiento de datos del TEC	17
2.3. Análisis de datos astronómicos con el software NRAO CASA	29
2.3.1. Calibraciones de datos y obtención de resultados	30
3. Resultados, conclusiones y recomendaciones	39
3.1. Periodos hallados en el análisis de datos del TEC sobre el Ecuador	39

3.1.1. Periodo de 167.196 ± 35.385177 días	39
3.1.2. Periodo de 17.203 ± 4.888 días	44
3.1.3. Periodo de 1 día	48
3.2. Procesamiento de imágenes de cuerpos celestes que emiten en radiofrecuencias	49
3.3. Conclusiones y recomendaciones	54
Bibliografía	57

Índice de figuras

1.1. Estructura de la atmósfera y densidad electrónica ionosférica. [11]	5
1.2. Ciclo solar	6
1.3. Sistema de posicionamiento satelital	8
1.4. Señales desviadas en la ionosfera	9
2.1. Ubicación referencial de las tres estaciones GPS [19]	17
2.2. Evolución del TEC en 1 día para la estación RIOP	18
2.3. Evolución del TEC en 1 día para la estación MAEC	19
2.4. Evolución del TEC en 1 día para la estación TPEC	19
2.5. Evolución del TEC en 10 días para la estación RIOP	20
2.6. Evolución del TEC en 10 días para la estación MAEC	20
2.7. Evolución del TEC en 10 días para la estación TPEC	21
2.8. Evolución del TEC en 30 días para la estación RIOP	21
2.9. Evolución del TEC en 30 días para la estación MAEC	22
2.10Evolución del TEC en 30 días para la estación TPEC	22
2.11Evolución del TEC en 100 días para la estación RIOP	23
2.12Evolución del TEC en 100 días para la estación MAEC	23
2.13Evolución del TEC en 100 días para la estación TPEC	24
2.14Evolución del TEC en 365 días para la estación RIOP	24

2.15	Evolución del TEC en 365 días para la estación MAEC	25
2.16	Evolución del TEC en 365 días para la estación TPEC	25
2.17	Evolución del TEC en 500 días para la estación RIOP	26
2.18	Evolución del TEC en 500 días para la estación MAEC	26
2.19	Evolución del TEC en 500 días para la estación TPEC	26
2.20	Evolución del TEC en 1600 días para la estación RIOP	27
2.21	Evolución del TEC en 1600 días para la estación MAEC	27
2.22	Evolución del TEC en 1600 días para la estación TPEC	27
3.1.	Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación RIOP	40
3.2.	Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación MAEC	40
3.3.	Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación TPEC	41
3.4.	Equinoccios con la Tierra como centro de referencias	43
3.5.	Zona de Convergencia InterTropical	44
3.6.	Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación RIOP	45
3.7.	Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación MAEC	45
3.8.	Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación TPEC	46
3.9.	Espectro de potencias	48
3.10	Amplitud vs. Frecuencia	49
3.11	3C-286	50
3.12	Calibración de los datos astronómicos de 3C-295	51
3.13	Datos astronómicos de 3C-295 ampliados	51

3.14. Calibración de los datos astronómicos de 3C-129 y la señal pura junto con el retardo ionosférico ocasionado por el TEC del Ecuador	52
3.15. Ampliación para ver los dos jets del cuásar de la calibración de los datos astronómicos de 3C-129	53
3.16. Ampliación para ver los dos jets del cuásar de 3C-129 cuando se contamina la señal con el TEC del Ecuador	53

Capítulo 1

Descripción del componente desarrollado

1.1. Definición del problema

La ionosfera es una región de la Tierra donde la atmósfera es ionizada por la radiación solar. Esta capa atmosférica cumple una función muy importante en la propagación de radio ondas, comunicaciones de satélites, sistemas de navegación global y observación de señales de cuerpos celestes. Esto se debe a que las señales que pasan por la ionosfera sufren retardos y desviaciones. Esto sucede porque se generan electrones debido a la radiación electromagnética que viene principalmente del sol como la radiación ultravioleta o mas energética que incide sobre moléculas y átomos de la atmósfera que desprende electrones y rompe moléculas. De ese modo se generan iones y electrones libres que se pueden mover en la ionosfera debido a campos electromagnéticos, en particular, el campo magnético de la Tierra.

A partir de este fenómeno se puede calcular el Contenido Total de Electrones (TEC) expresado en TECu (TEC Unit), el TEC puede entenderse como una medida de cuántos electrones hay en una columna vertical de la ionosfera. Esta información es muy importante, debido a que al corregir los efectos de la interacción de una señal electromagnética con el TEC, se puede tener una observación más limpia de un cuerpo Celeste y mejorar la precisión del posicionamiento por satélites. [11][1][13][17]

Cambios en el TEC pueden llevar a fluctuaciones en la fase y en la amplitud de señales electromagnéticas, así como retardos en las mismas, dando lugar a que la calidad de las observaciones astronómicas se vean afectadas por el TEC. Por tanto, entendiendo el comportamiento y la interacción del TEC con las señales de radio, se puede mitigar los efectos de de la ionosfera en las observaciones astronómicas o en las señales satelitales de posicionamiento.

1.2. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es analizar, estudiar y caracterizar el comportamiento del Contenido Total de Electrones (TEC) sobre el Ecuador, en tres estaciones específicas. Este trabajo contempla un intervalo de tiempo de aproximadamente cinco años, identificando patrones y comportamientos periódicos. Además, se explora el uso de la herramienta NRAO CASA para procesar datos astronómicos.

1.3. Objetivos específicos

1. Estudiar y entender el comportamiento del TEC en tres estaciones distribuidas en el Ecuador (RIOP en la ciudad de Riobamba en la provincia de Chimborazo, TPEC en Tiputini en la provincia de Orellana y MAEC en la ciudad de Macas en la provincia de Morona Santiago). Además, analizar su interacción con las señales electromagnéticas que interactúan con la ionosfera, ya sean señales de objetos celestes o bien de satélites GPS.
2. Realizar el análisis de datos del TEC a fin de estudiar los periodos característicos de éste y proponer explicaciones físicas o posibles causas de los mismos. Para hallar los periodos son necesarios diversos métodos como el uso de la transformada de Fourier de evoluciones temporales, análisis de tendencias y análisis de máximos

locales. Utilizando códigos computacionales

3. Comprender el funcionamiento de las herramientas del software para astronomía NRAO CASA y utilizar el TEC para el procesamiento de datos astronómicos. Realizar calibraciones y correcciones en las señales debido a los retardos ionosféricos, así como simular la observación de un cuerpo celeste desde el Ecuador.

1.4. Alcance

El alcance de este proyecto se extiende a una exploración y análisis del comportamiento del TEC en tres estaciones ubicadas en distintos lugares del Ecuador: RIOP en Riobamba, TPEC en Tiputini y MAEC en Macas. Este estudio involucra la comprensión de la interacción del TEC con las señales electromagnéticas que se propagan en la ionosfera. Estas señales pueden ser provenientes de objetos celestes, particularmente que emitan en radiofrecuencias, o de satélites geoestacionarios GPS.

Se llevarán a cabo análisis exhaustivos de los datos del TEC con el propósito de identificar patrones y periodos característicos presentes en la serie temporal. Estos análisis se basan en el uso de la transformada de Fourier, análisis de tendencias con medias móviles y el análisis de máximos locales utilizando herramientas de programación como Python y C++. El objetivo es encontrar posibles correlaciones entre los periodos de variación del TEC y los fenómenos astronómicos, atmosféricos, o climáticos.

En paralelo, se buscará la familiarización con el software NRAO CASA, que es ampliamente utilizado en astronomía. Se explotará parte de su potencial para procesar datos astronómicos, particularmente en lo que respecta a la calibración y corrección de señales por afectación de la ionosfera, así como la simulación de observaciones desde el Ecuador. Este aspecto del proyecto brindará la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos en un contexto práctico.

1.5. Marco teórico

1.5.1. Estructura de la ionosfera

La ionosfera es un plasma magnéticamente activo que actúa como un medio refractivo, principalmente para las fuentes que emiten en frecuencias anchas como las radiofrecuencias (aproximadamente de 3 KHz a 30 GHz). Esto ocurre principalmente porque las longitudes de onda radio son relativamente largas en comparación con otras longitudes de onda del espectro electromagnético, y al ser más largas su tamaño físico es comparable con las separaciones de los electrones libres en la ionosfera. De ese modo son más susceptibles a la interacción con los electrones de la ionosfera, implicando refracción dispersión y absorción. [3][11]

La ionosfera, considerada aproximadamente entre los 50 km hasta unos 1000 km, está compuesta de varias capas o regiones, las capas: F, E y D. Durante el día se tiene la presencia de estas 3 capas a causa de la intensa radiación solar. Sin embargo, durante la noche, la radiación solar disminuye significativamente. Esto ocasiona una disminución en la ionización de la atmósfera superior, por ende la densidad de electrones en la capa D, que es la capa mas baja, disminuye tanto que incluso hasta llega a desaparecer. [11]

La capa D, que se encuentra aproximadamente entre 50 y 90 km de altitud, registra densidades electrónicas durante el día de al rededor de $10^3 e^-/cm^3$. La capa E, ubicada aproximadamente entre los 90 y 200 km, registra densidades de alrededor de los $10^4 e^-/cm^3$ a los $10^5 e^-/cm^3$. Para las capas D y E, la densidad electrónica aumenta a medida que aumenta la altitud. Por otro lado, para la capa F la densidad electrónica es inversamente proporcional a la altitud, comenzando por al rededor de $10^6 e^-/cm^3$ a los 200 km durante el día y con valores de densidad menores con la altura. [4][7]

En la noche los valores de todas las capas disminuyen cerca de un orden de magnitud, dado que la principal fuente ionización ya no es el sol, sino

la radiación cósmica, como se aprecia en la siguiente figura.

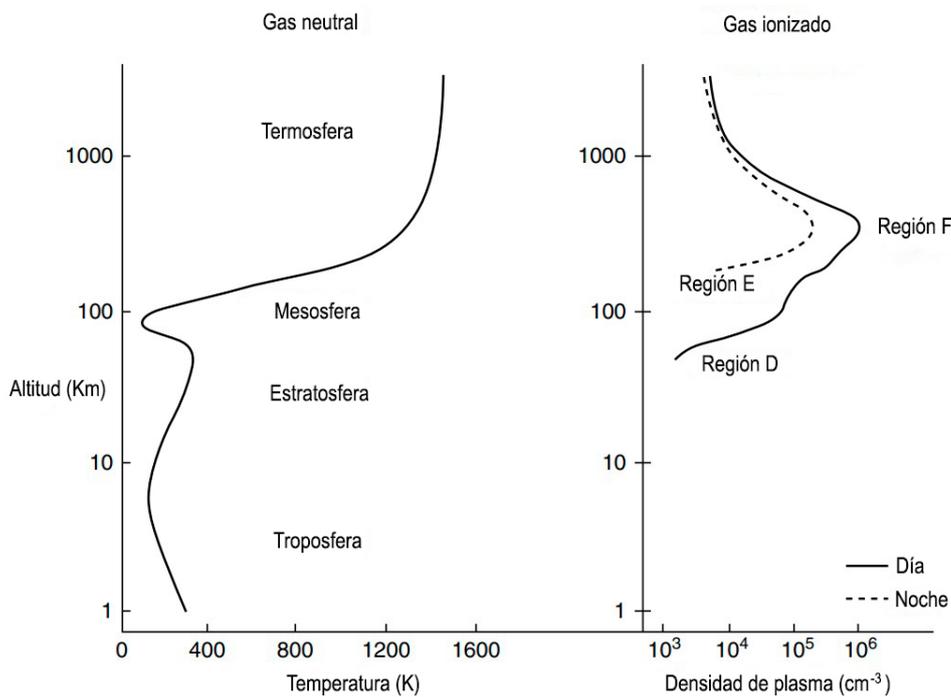


Figura 1.1: Estructura de la atmósfera y densidad electrónica ionosférica. [11]

1.5.2. Interacción de señales de radiofrecuencias con electrones ionosféricos en la zona ecuatorial

Al rededor de la zona ecuatorial se tienen valores mas altos de densidad electrónica en la ionosfera. Este fenómeno se debe a varios factores, entre ellos esta la alta radiación solar y el campo magnético terrestre.

El campo geomagnético se caracteriza por tres componentes magnéticas: X , Y y Z . La componente X apunta hacia el norte geográfico, la componente Y apunta hacia el este y la componente Z , perpendicular a ambos, hacia el centro de la tierra. Las componentes horizontales X y Y forman la componente horizontal $H = \sqrt{(X^2 + Y^2)}$. Al sumar la componente vertical Z , se obtiene la intensidad total del campo magnético $F = \sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)}$. [11][15]

Cuando una radio señal se propaga a través de la ionosfera, sufre varios efectos debido a la interacción con las partículas cargadas presentes en esta región. Estos efectos se conocen como retardos ionosféricos, que ocurren cuando las diferentes frecuencias que componen la señal se desvían en diferentes direcciones debido a la variación de la densidad de electrones en la ionosfera. Esto puede causar distorsión y desvanecimiento de la señal, lo que dificulta que su recepción sea clara y precisa.

Además, hay varios fenómenos que pueden alterar aún más estas señales electromagnéticas; como el ciclo de actividad solar y las tormentas ionosféricas. El ciclo solar, con una duración de 11 años, juega un papel importante en la densidad de electrones de la ionosfera. Cuando el ciclo está en su mínimo no hay afectaciones importantes en la atmósfera. Mientras que en su máximo hay alteraciones tanto en el contenido total de electrones como en la dinámica de toda la ionosfera[6].

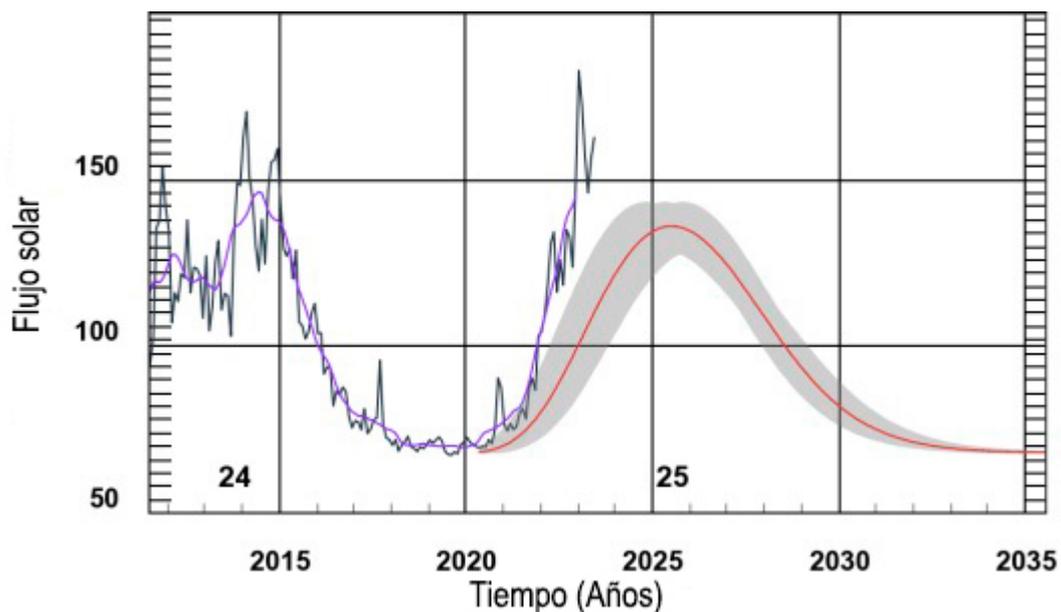


Figura 1.2: Ciclo solar

Por otro lado, las tormentas ionosféricas no son cíclicas. Estas de igual modo tienen su origen en el Sol. Principalmente se deben a las erupciones solares en las que se irradian cantidades mayores de energía que penetran toda la ionosfera causando alteraciones significativas.

1.5.3. Sistema global de posicionamiento satelital (GNSS)

El posicionamiento satelital se basa en la recepción de señales emitidas por satélites en el espacio. Estos satélites emiten señales de radiofrecuencia hacia la Tierra, y los receptores en la superficie terrestre captan estas señales que atraviesan la ionosfera. Este proceso de posicionamiento solo es posible gracias a los relojes precisos en los satélites.

Asumiendo que estos satélites están estáticos por un intervalo de tiempo suficiente, se puede calcular el vector espacial ρ_s relativo al centro de la Tierra para cada satélite. El receptor en la tierra está definido por su vector de posición geocéntrica ρ_r . Este receptor utiliza un reloj que ajusta con precisión la hora del sistema y la distancia geométrica o rango ρ asociada a cada satélite. Esta puede medirse con exactitud registrando el tiempo requerido para que la señal emitida llegue al receptor en tierra. Cada rango define una esfera con el centro en la posición del satélite. [9][12][10]:

$$\rho = \|\rho_s - \rho_r\|. \quad (1.1)$$

Cuando un receptor en la Tierra, como una antena, recibe señales de satélites, este calcula la diferencia de tiempo entre las señales recibidas y las transmitidas por los satélites. Esta diferencia de tiempo se convierte en una distancia medida en unidades de tiempo, que es fundamental para determinar la posición.

El pseudorango P se define como la cantidad obtenida al aplicar una corrección de distancia $\Delta\rho$ debido al retardo del reloj y se expresa de la siguiente manera:

$$P = \rho + \Delta\rho = \rho + c\delta \quad (1.2)$$

Así, el receptor calcula su posición en función de las distancias medidas o rangos desde sí mismo a los satélites. Este método implica la intersección de esferas imaginarias alrededor de cada satélite, y la posición del receptor es el punto donde se cruzan estas esferas.

La precisión de un sistema de un de posicionamiento satelital utiliza la sincronización de las señales mediante relojes precisos como los relojes atómicos, basándose en dos frecuencias fundamentales: $f_1 = 1575,42$ MHz y $f_2 = 1227,6$ MHz [12][10]

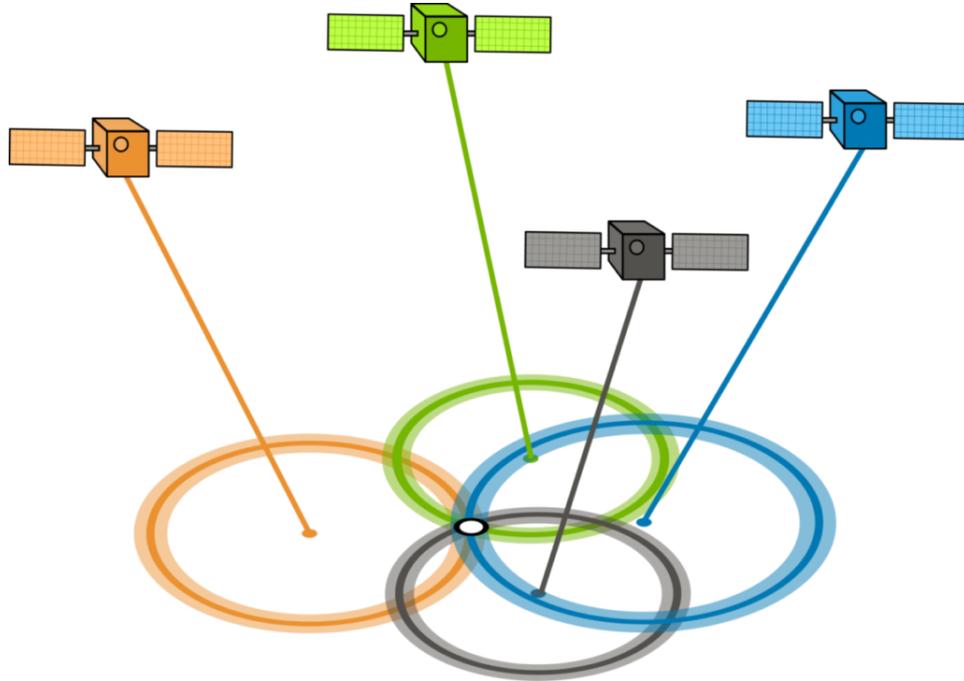


Figura 1.3: Sistema de posicionamiento satelital

Ahora, es importante tener en cuenta que las señales que pasan por la atmósfera sufren retardos ocasionados por los electrones en la ionosfera, ya que la señal interactúa en esta capa y llega *desviada* al receptor. Este es el objetivo del análisis de TEC, la corrección de señales que vienen de satélites o de cuerpos celestes.

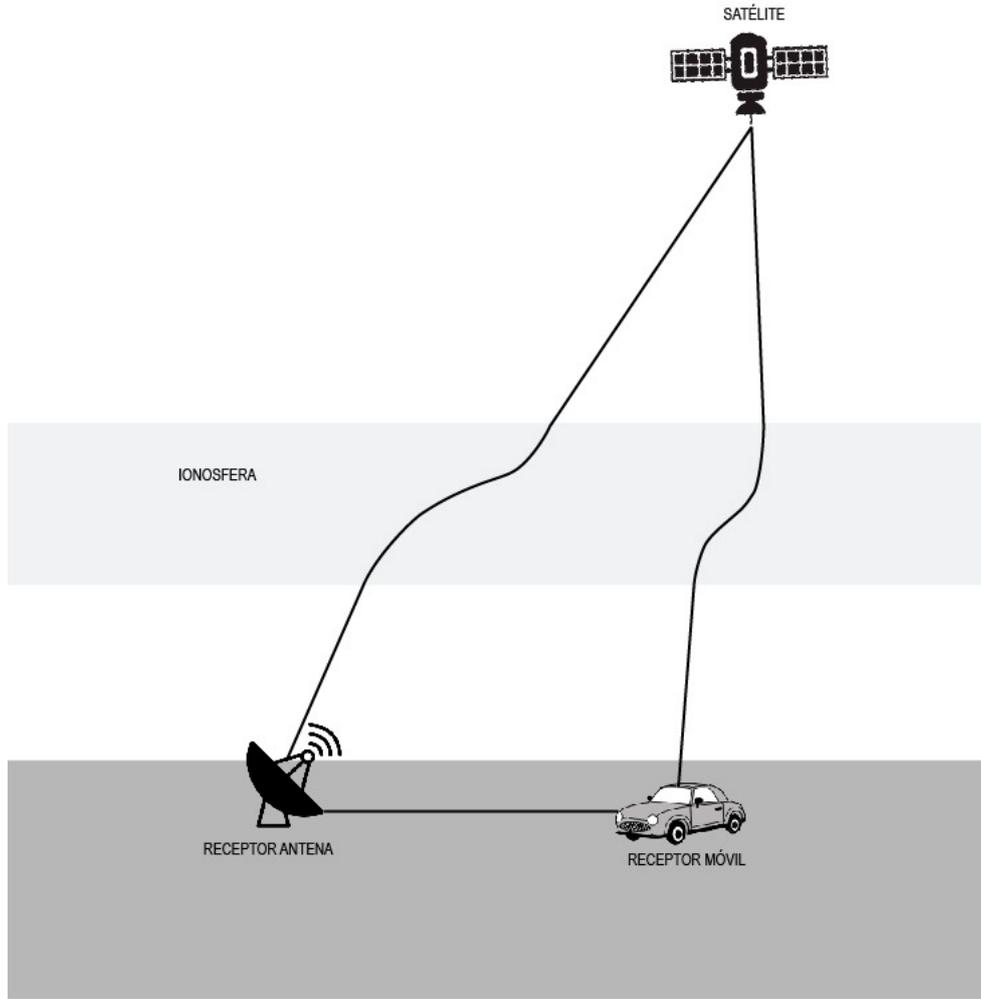


Figura 1.4: Señales desviadas en la ionosfera

Se puede estudiar esta interacción como si la ionosfera fuera un medio refractivo cuyo índice de refracción esta dado por la ecuación de Appleton-Hartree. [10] [5].

$$n^2 = 1 - \frac{X}{(1 - jZ) - \frac{Y_T^2}{2(1-X-jZ)} \pm \left(\frac{Y_T^4}{4(1-X-jZ)^2} + Y_L^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1.3)$$

con, $X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2} = \frac{f_N^2}{f^2}$; $Y = \frac{\omega_H}{\omega} = \frac{f_H}{f}$; $Y_L = \frac{\omega_L}{\omega}$, $Y_T = \frac{\omega_T}{\omega}$; $Z = \frac{\omega_C}{\omega}$.

En donde se tiene;

ω es la frecuencia angular de la onda portadora.

ω_C es la frecuencia angular de colisión.

ω_N es la frecuencia angular del plasma ionosférico, donde $\omega_N = \sqrt{\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_e}}$, con una concentración electrónica N , carga electrónica e , permitividad dieléctrica del vacío ε_0 y masa electrónica m_e .

ω_H es la frecuencia angular del ciclotrón, y ω_L y ω_T son, a su vez, las frecuencias longitudinales y transversales del ciclotrón.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Recopilación y visualización de datos

2.1.1. Cálculo del TEC

Para calcular el TEC es necesario hallar algunas cosas, lo más importante son los índices de refracción de grupo y de fase que sirven para hallar el retardo ionosférico $delay_{ion}$, y este a su vez, se emplea en una expresión más detallada para el pseudorange P_i .

Retardos ionosféricos e índices de refracción

Al desarrollar la ecuación 1.3 en serie de Taylor para $1/f$, se tiene

$$n \approx 1 - \frac{1}{2}X \pm \frac{1}{2}XY|\cos(\theta)| - \frac{1}{8}X^2 - \frac{1}{4}XY^2(1 + \cos^2(\theta)) + \dots \quad (2.1)$$

Si se desprecia el campo magnético, y reemplazando $X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2} = \frac{f_N^2}{f^2}$, el índice de refracción se puede expresar como:

$$n = 1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_N^2}{\omega^2} = 1 - \frac{Ne^2}{2\epsilon_0 m \omega^2} \quad (2.2)$$

Ahora, los índices de refracción se definen como la razón entre la velocidad de la luz y la velocidad asociada de grupo o fase están definidas de la siguiente manera:

$$n_{group} = \frac{c}{v_{group}} = \left(1 - \left(\frac{\omega_N^2}{\omega^2}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

Y,

$$n_{phase} = \frac{c}{v_{phase}} = \left(1 - \left(\frac{\omega_N^2}{\omega^2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Entonces, como se tiene que $\frac{\omega_N}{\omega}$ mucho menor a 1, se pueden hacer las siguientes aproximaciones:

$$n_{group} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_N}{\omega}\right)^2 \approx 1 + \frac{Ne^2}{2\epsilon_0 m \omega^2} \quad (2.5)$$

Y,

$$n_{phase} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_N}{\omega}\right)^2 \approx 1 - \frac{Ne^2}{2\epsilon_0 m \omega^2} \quad (2.6)$$

Ahora, para hallar el retardo ionosférico, se parte del camino geométrico C entre el satélite y el receptor, definido por la integral del índice de refracción en el camino C :

$$C = \int_{satellite}^{receptor} n ds \quad (2.7)$$

Como el índice de refracción n puede expresarse como la suma de la parte sin considerar las desviaciones y la parte asociada a las desviaciones o retardos se tiene $n = 1 + D$, por este modo se tiene una integral de una suma, donde la primera parte es únicamente el pseudorange y la segunda, el retardo ionosférico

$$C = \int_{satellite}^{receptor} (1 \pm D) ds = \rho \pm delay_{ion} \quad (2.8)$$

Calculando el retardo ionosférico, dado por:

$$delay_{ion-i} = \int_{satlite}^{receptor} (n_i - 1) ds \quad (2.9)$$

Tal que:

$$delay_{ion-group} = \int_{satlite}^{receptor} (n_{group} - 1) ds \quad (2.10)$$

Y,

$$delay_{ion-phase} = \int_{satlite}^{receptor} (n_{phase} - 1) ds \quad (2.11)$$

Utilizando las ecuaciones 2.5 y 2.6 se tiene:

$$delay_{ion-group} = \frac{e^2}{2m\epsilon\omega^2} \int_{satlite}^{receptor} N ds \quad (2.12)$$

Y,

$$delay_{ion-phase} = -\frac{e^2}{2m\epsilon\omega^2} \int_{satlite}^{receptor} N ds \quad (2.13)$$

Como podemos escribir el contenido total de electrones (TEC) como la integral en el camino geométrico del satélite al receptor $TEC = \int_{satlite}^{receptor} N ds$ se tiene:

$$delay_{ion-group} = \frac{e^2}{2m\epsilon\omega^2} TEC \quad (2.14)$$

Y,

$$delay_{ion-phase} = -\frac{e^2}{2m\epsilon\omega^2} TEC \quad (2.15)$$

Así, utilizando las constantes conocidas para la carga del electrón, la

permitividad eléctrica en el vacío y la masa electrónica, se puede llegar a las expresiones:

$$delay_{ion-group} = 40,3 \frac{TEC}{f^2} \quad (2.16)$$

$$delay_{ion-phase} = -40,3 \frac{TEC}{f^2} \quad (2.17)$$

Es importante considerar que la mayor fuente de error en el sistema de posicionamiento satelital es justamente la desviación de las señales al pasar por la ionosfera y sufrir perturbaciones.[18][5]

Pseudorange

Dando una expresión mas completa del pseudorange, para hallar el TEC asociado al pseudorange TEC_P , con dt , el desfase del reloj receptor, dT , el desfase del reloj del satélite, $delay_{trop}$ el retardo troposférico. Se tiene la diferencia entre las señales emitidas y transmitidas :[2][7]

$$P_1 = \rho + c[dt - dT] + delay_{ion1} + delay_{trop} + ruido \quad (2.18)$$

$$P_2 = \rho + c(dt - dT) + delay_{ion2} + delay_{trop} + ruido \quad (2.19)$$

Al restar 2.19 de 2.18, despreciando el ruido, se tiene:

$$P_1 - P_2 = d_{ion1} - d_{ion2} \quad (2.20)$$

Reemplazando 2.16 se tiene:

$$P_1 - P_2 = 40,3 \frac{TEC_p}{f_1^2} - 40,3 \frac{TEC_p}{f_2^2}$$

De ese modo el TEC_P es:

$$TEC_P = \frac{P_1 - P_2}{40,3} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \quad (2.21)$$

Fase portadora

La fase portadora ϕ es la diferencia de fase entre las señales transmitidas desde un satélite GPS y las señales recibidas en la Tierra. Esta diferencia de fase es utilizada para estimar el retraso ionosférico y calcular el TEC asociado a la fase portadora, el TEC_ϕ . [20]

$$\phi_1 \lambda_1 = \rho + c(dt - dT) - delay_{ion,1} + delay_{trop} + \lambda_1 C_1 + r_{\phi_1} + \epsilon_{\phi_1} \quad (2.22)$$

$$\phi_2 \lambda_2 = \rho + c[dt - dT] - delay_{ion,2} + delay_{trop} + \lambda_2 C_2 + r_{\phi_2} + \epsilon_{\phi_2} \quad (2.23)$$

Donde C es la desviación de la fase portadora, λ su longitud de onda y r y ϵ términos asociados al ruido. Al restar 2.23 de 2.22 despreciando los términos asociados al ruido junto con $\lambda_i C_i$, pues, no contribuyen significativamente en la expresión se tiene:

$$\phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2 = delay_{ion,2} - delay_{ion,1} \quad (2.24)$$

Nuevamente, al utilizar la ecuación 2.16

$$\phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2 = 40,3 \frac{TEC_\phi}{f_2^2} - 40,3 \frac{TEC_\phi}{f_1^2} \quad (2.25)$$

Por lo tanto, el TEC_ϕ o TEC inclinado:

$$TEC_\phi = \frac{(\phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2)}{40,3} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \quad (2.26)$$

TEC vertical

El $TEC_{combinado}$, como su nombre indica, es una combinación del TEC_{ϕ} y del TEC_P , este representa una medida del contenido total de electrones por el camino que recorre la señal, desde el satélite hasta el receptor. Esto es de utilidad debido a las precisiones y ambigüedades distintas que manifiestan los dos cálculos del TEC y se lo calcula de la siguiente manera.[5][17][20]

$$TEC_{combinado_i} = TEC_{\phi_i} - \left(\frac{\sum_{j=i}^n pond_j \cdot TEC_{\phi_i} - pond_j \cdot TEC_{P_i}}{\sum_{j=1}^n pond_j} \right) \quad (2.27)$$

En esta ecuación se atenúan las imprecisiones de los cálculos previos, se hace el cálculo para i y j , observables ionosféricos. $pond_j$ es un ponderador que permite fijar el peso apropiado para TEC_{ϕ} y TEC_P en el cálculo.

Ahora, como esto registra el contenido total de electrones en una columna *inclinada*, se tiene que hacer una ultima corrección para tener el TEC en una columna vertical (TEC_V), esta corrección viene definida por $\bar{\chi}$, la diferencia angular entre una columna vertical y el ángulo al que se encuentra el satélite. La relación se define de la siguiente manera:[17][20][5][11]

$$TEC_v = TEC_{combinado} (\cos \bar{\chi}) \quad (2.28)$$

También es posible utilizar una corrección individual al TEC_P o al TEC_{ϕ} , de igual modo son maneras aproximandas de obtener el TEC_v con un poco mas de error. En este caso se utiliza el TEC_v asociado al pseudorange:

$$TEC_v \approx TEC_P (\cos \bar{\chi}) \quad (2.29)$$

2.2. Recopilación, análisis y tratamiento de datos del TEC

Se recopilaron los datos para tres estaciones (RIOP, MAEC y TPEC) del Instituto Geográfico Militar (IGM), donde se tienen los datos del TEC diario con intervalos de 30 segundos, es importante recalcar que hay días en los que las estaciones no trabajaron u ocurrieron errores en las medidas, los mismos que son descartados. Por ese motivo, no hay el mismo número de datos para las tres estaciones.

Se garantizó que los datos recopilados de las tres estaciones representen adecuadamente el TEC en el Ecuador, pues, las estaciones están separadas entre sí.

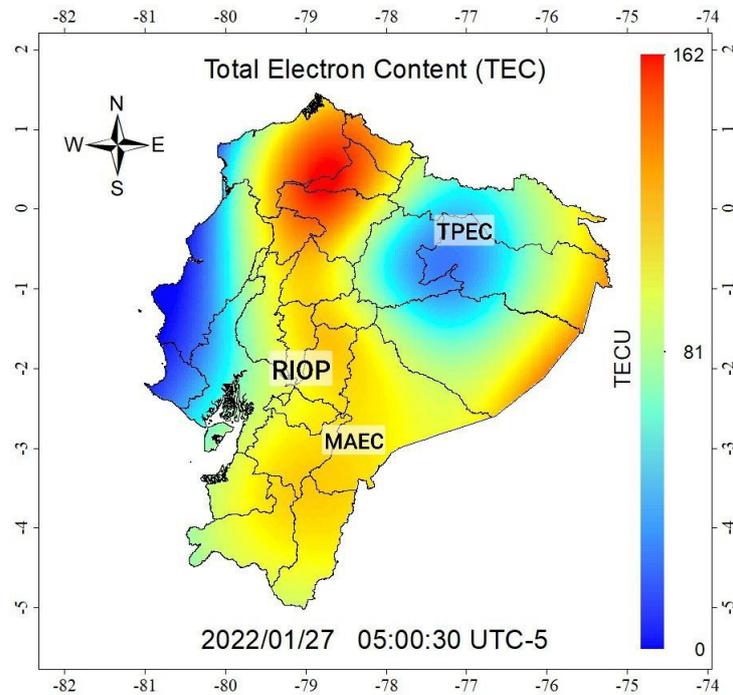


Figura 2.1: Ubicación referencial de las tres estaciones GPS [19]

Se descargaron datos del TEC durante un período de casi 5 años, a partir del 2018 hasta ya avanzado el 2022 para cada una de las estaciones. Estos datos se los procesaron mediante un código en Fortran para poder analizarlos, están en unidades $[\text{TECU} = 10^{16} \frac{\text{electrones}}{\text{m}^2}]$.

Para obtener una visión general de la evolución del TEC en cada estación a lo largo del tiempo, se realizó un programa en Python que transforma el valor de la fecha que se encuentra en el formato:

AAAAMMDDHHNNSS (Año(A)Mes(M)Día(D)Hora(H)Minuto(N)Segundo(s)) para dejarlo en días, luego se eliminan los datos inconsistentes; datos con valores de TEC muy altos o cercanos a cero. Posteriormente, se utilizó la herramienta GNUPLOT para generar gráficas de la serie temporal de TEC en función del tiempo.

Las imágenes resultantes muestran la variación del TEC para distintos periodos de tiempo, estos gráficos proporcionan una visión preliminar de posibles patrones periódicos.

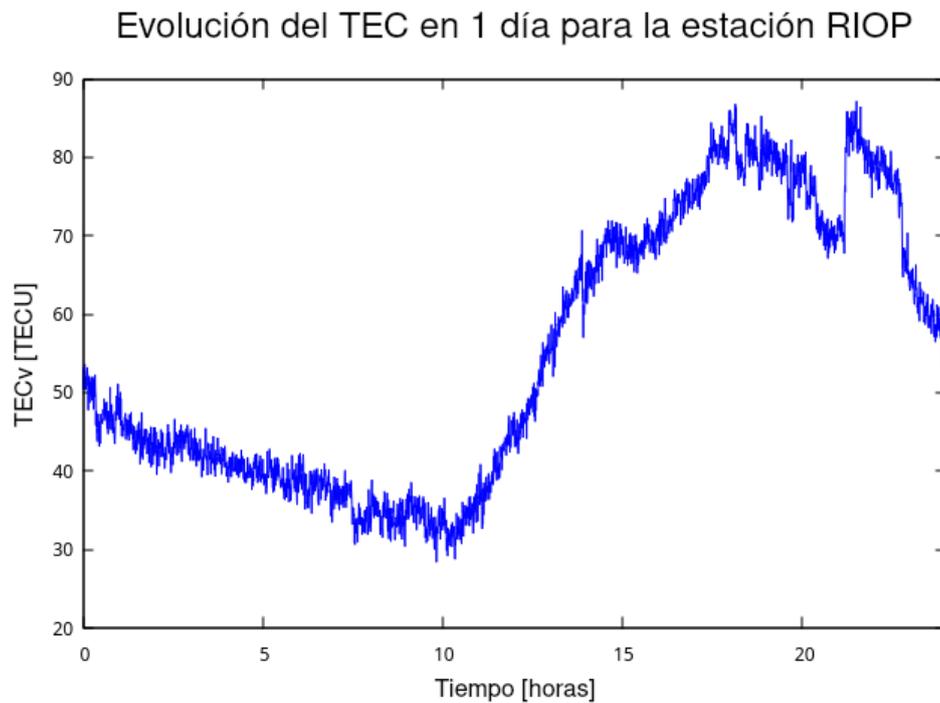


Figura 2.2: Evolución del TEC en 1 día para la estación RIOP

Evolución del TEC en 1 día para la estación MAEC

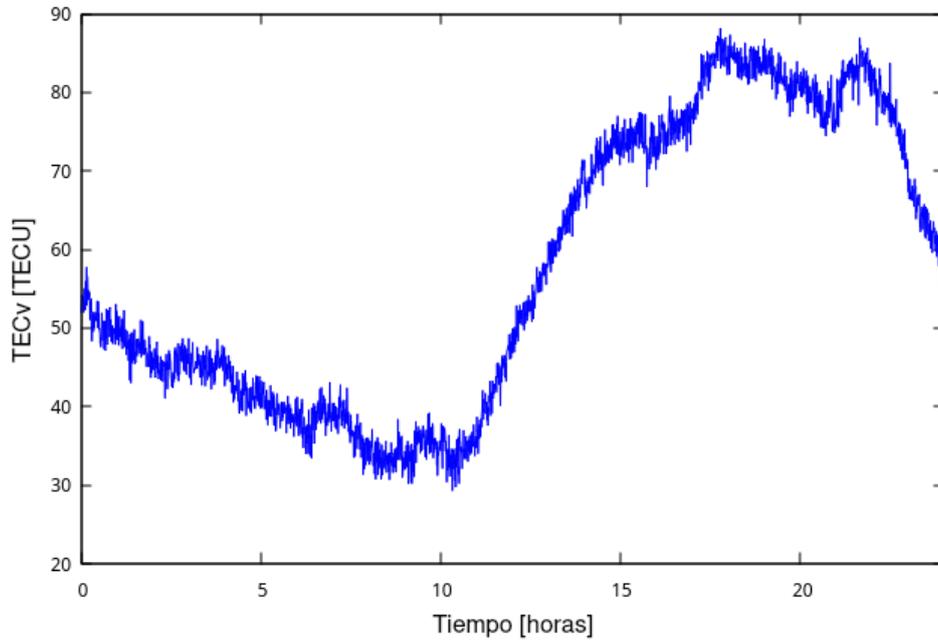


Figura 2.3: Evolución del TEC en 1 día para la estación MAEC

Evolución del TEC en 1 día para la estación TPEC

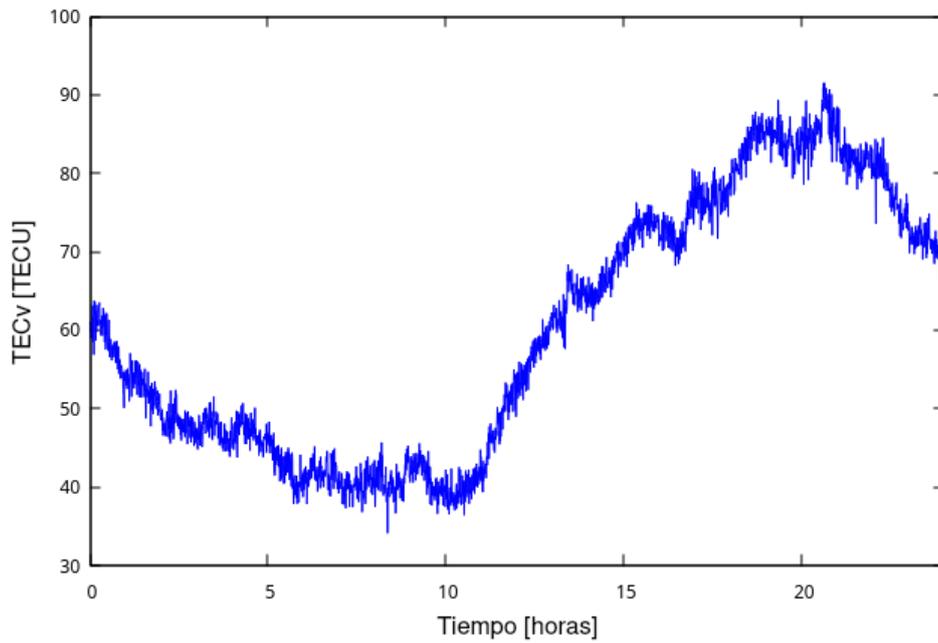


Figura 2.4: Evolución del TEC en 1 día para la estación TPEC

Evolución del TEC en 10 días para la estación RIOP

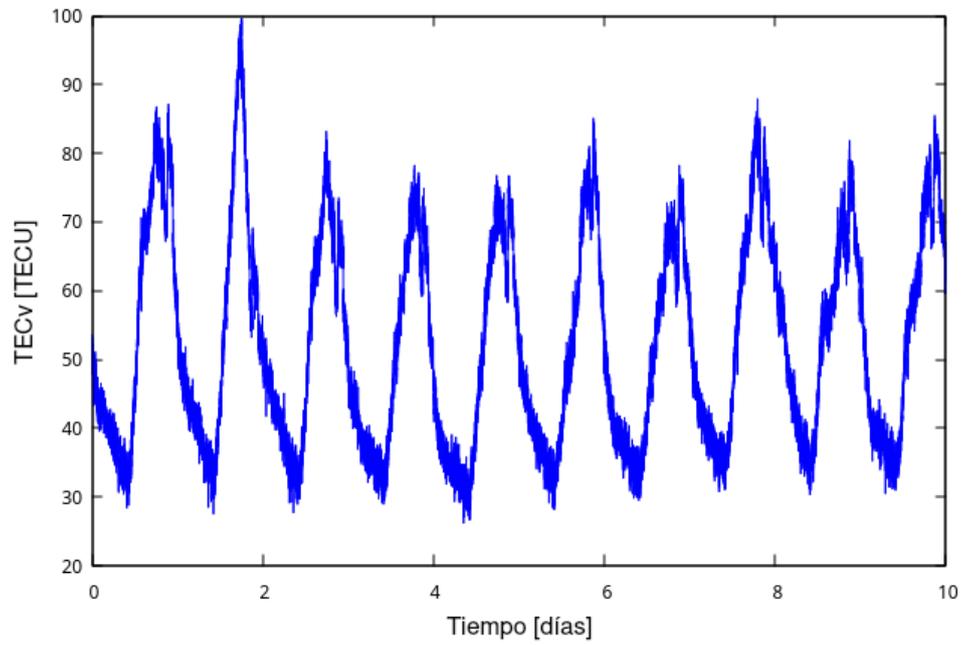


Figura 2.5: Evolución del TEC en 10 días para la estación RIOP

Evolución del TEC en 10 días para la estación MAEC

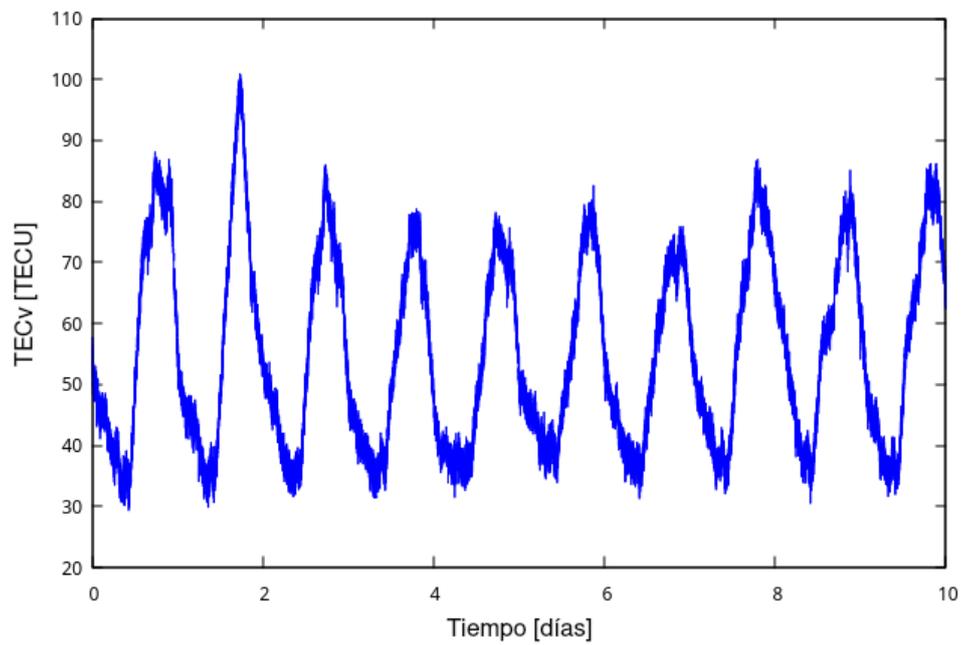


Figura 2.6: Evolución del TEC en 10 días para la estación MAEC

Evolución del TEC en 10 días para la estación TPEC

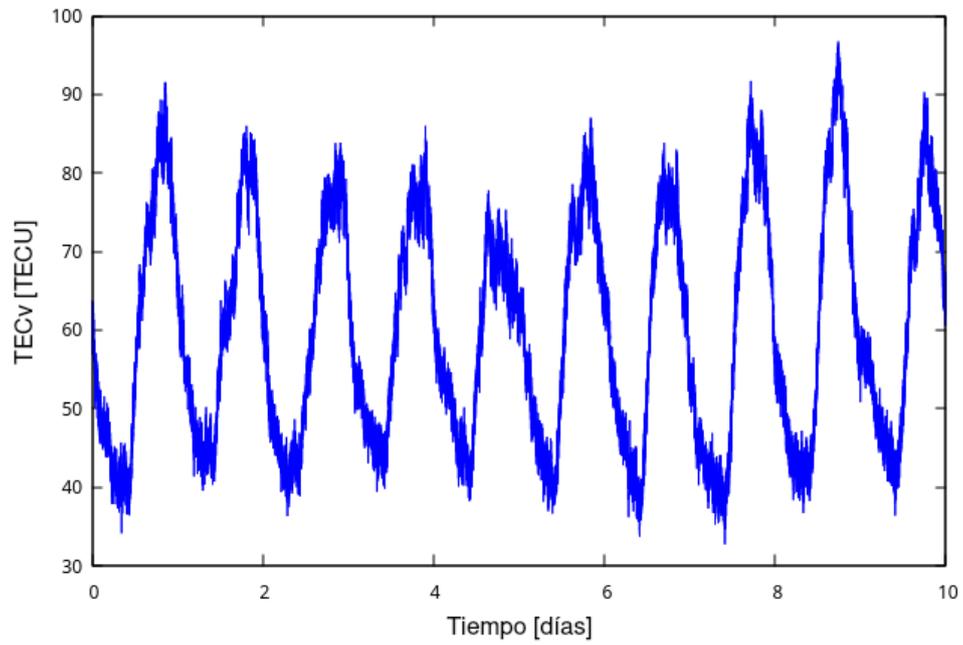


Figura 2.7: Evolución del TEC en 10 días para la estación TPEC

Evolución del TEC en 30 días para la estación RIOP

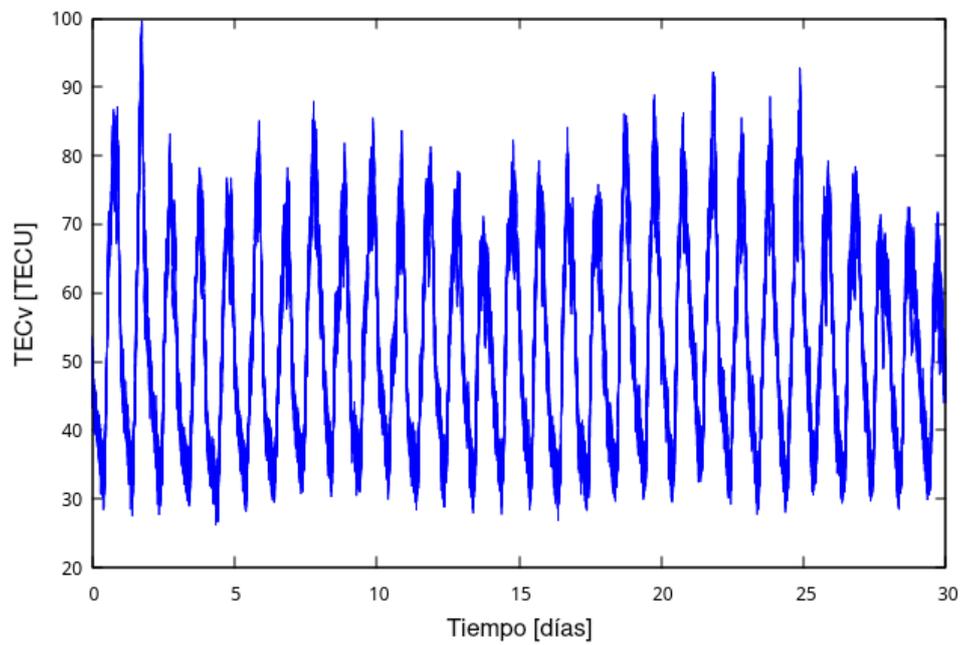


Figura 2.8: Evolución del TEC en 30 días para la estación RIOP

Evolución del TEC en 30 días para la estación MAEC

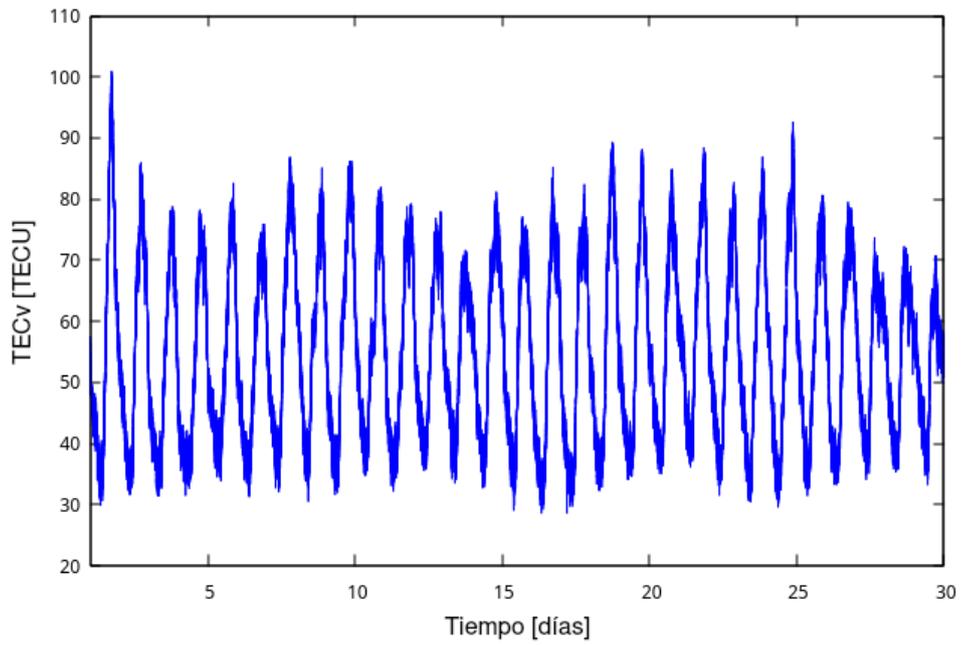


Figura 2.9: Evolución del TEC en 30 días para la estación MAEC

Evolución del TEC en 30 días para la estación TPEC

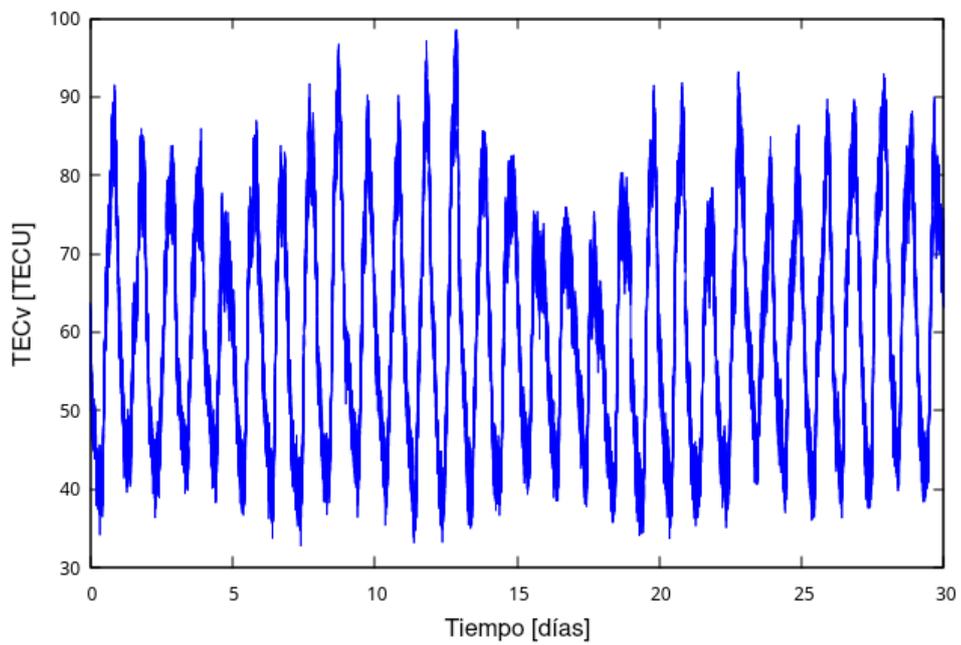


Figura 2.10: Evolución del TEC en 30 días para la estación TPEC

Evolución del TEC en 100 días para la estación RIOP

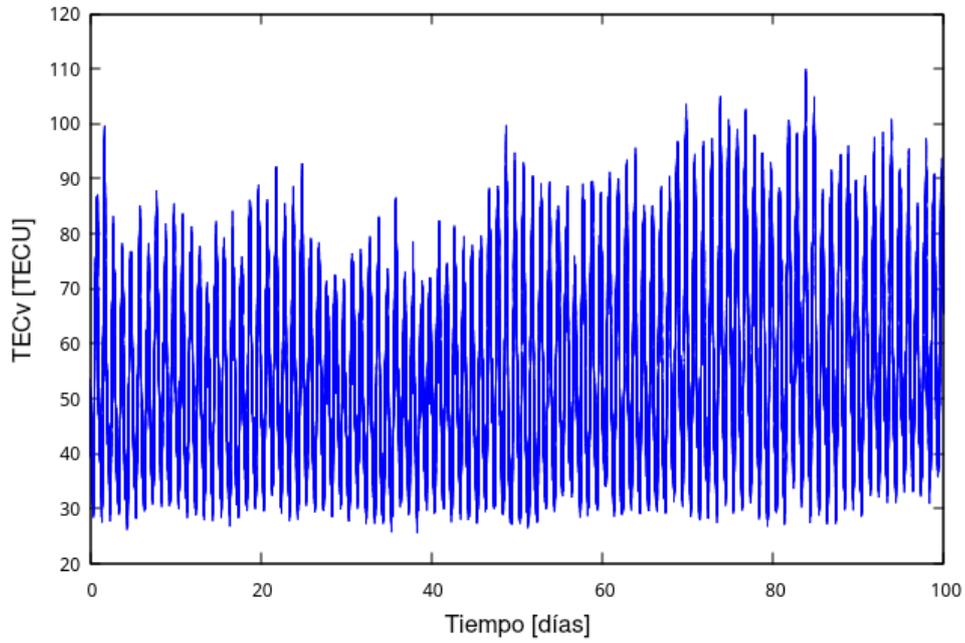


Figura 2.11: Evolución del TEC en 100 días para la estación RIOP

Evolución del TEC en 100 días para la estación MAEC

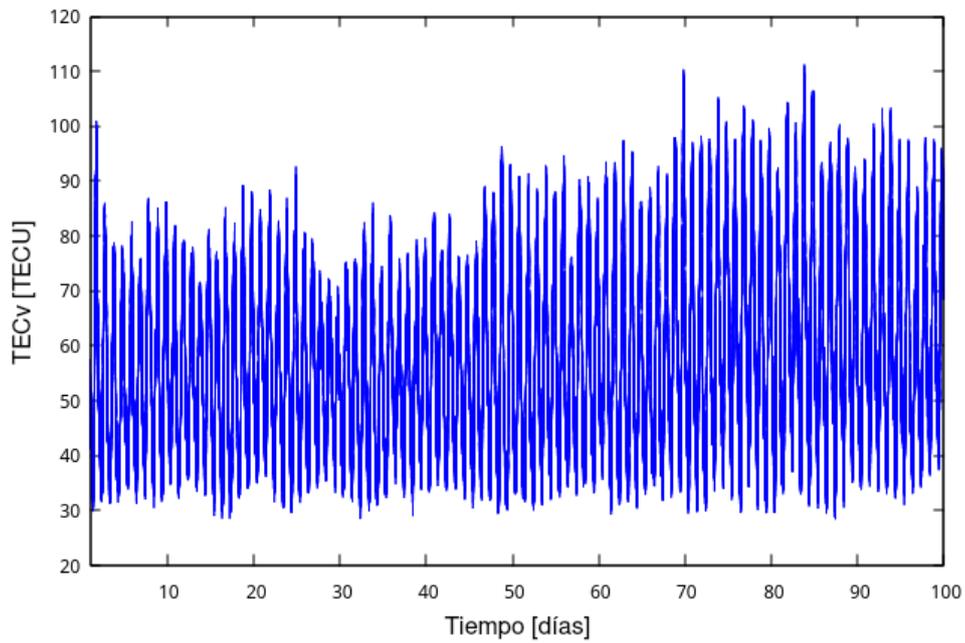


Figura 2.12: Evolución del TEC en 100 días para la estación MAEC

Evolución del TEC en 100 días para la estación TPEC

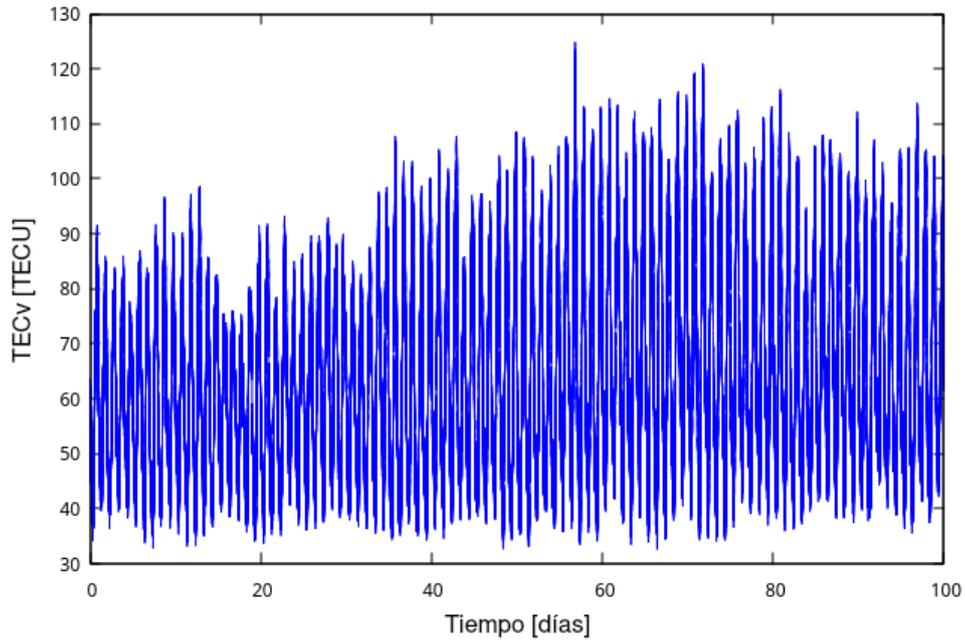


Figura 2.13: Evolución del TEC en 100 días para la estación TPEC

Evolución del TEC en 365 días para la estación RIOP

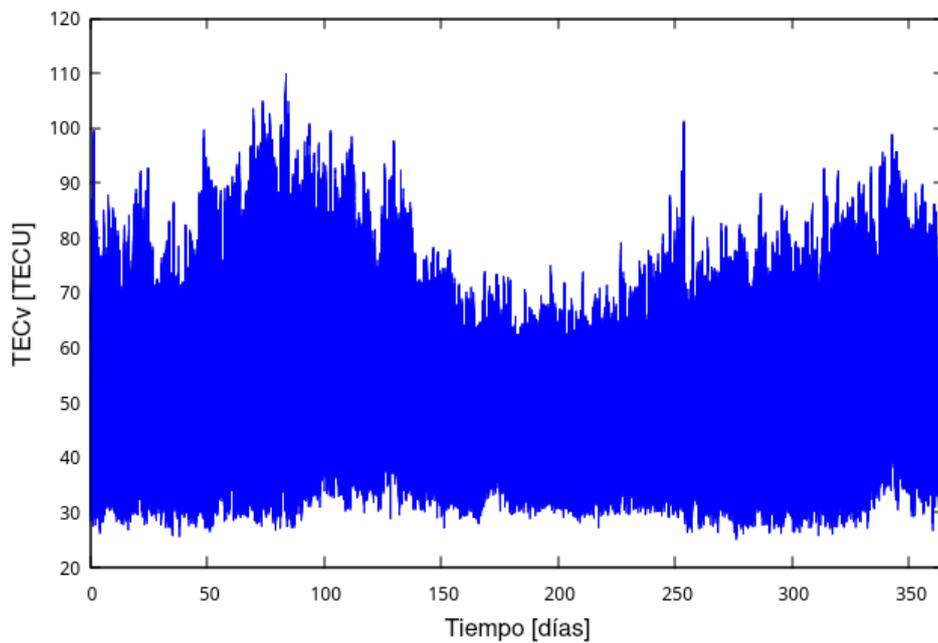


Figura 2.14: Evolución del TEC en 365 días para la estación RIOP

Evolucion del TEC en 365 días para la estación MAEC

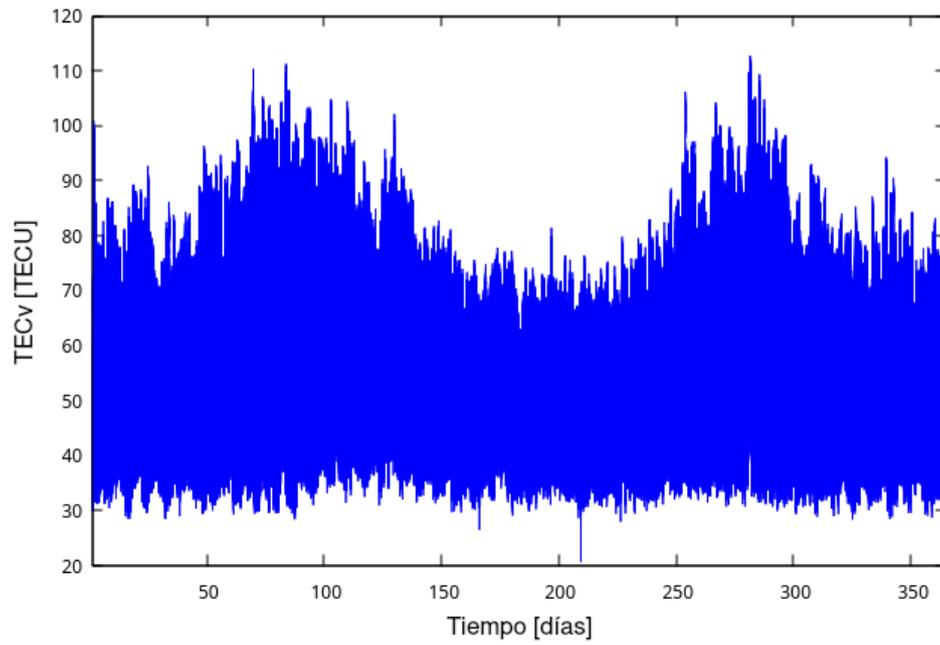


Figura 2.15: Evolución del TEC en 365 días para la estación MAEC

Evolución del TEC en 365 días para la estación TPEC

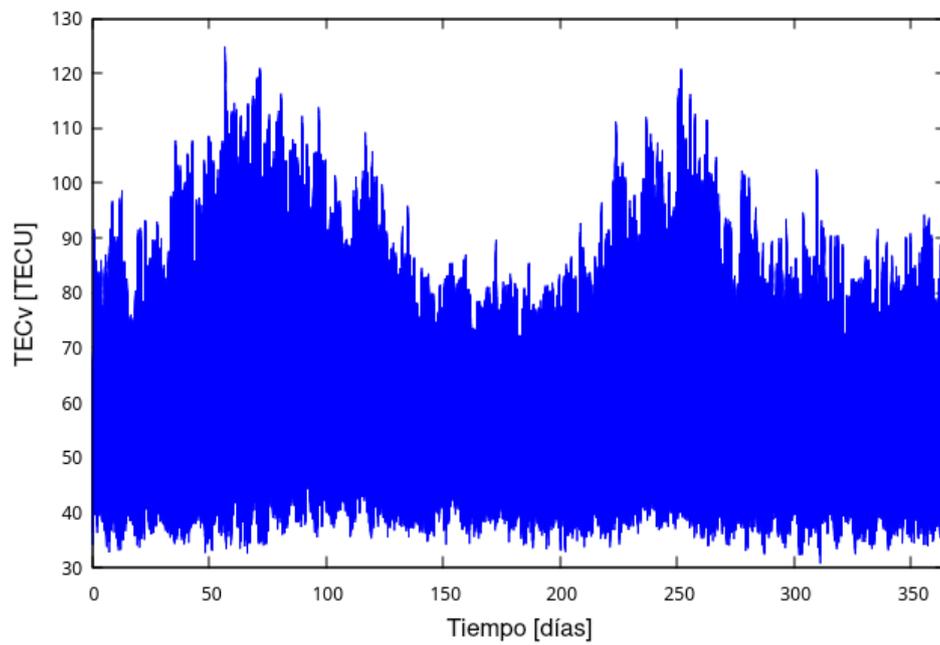


Figura 2.16: Evolución del TEC en 365 días para la estación TPEC

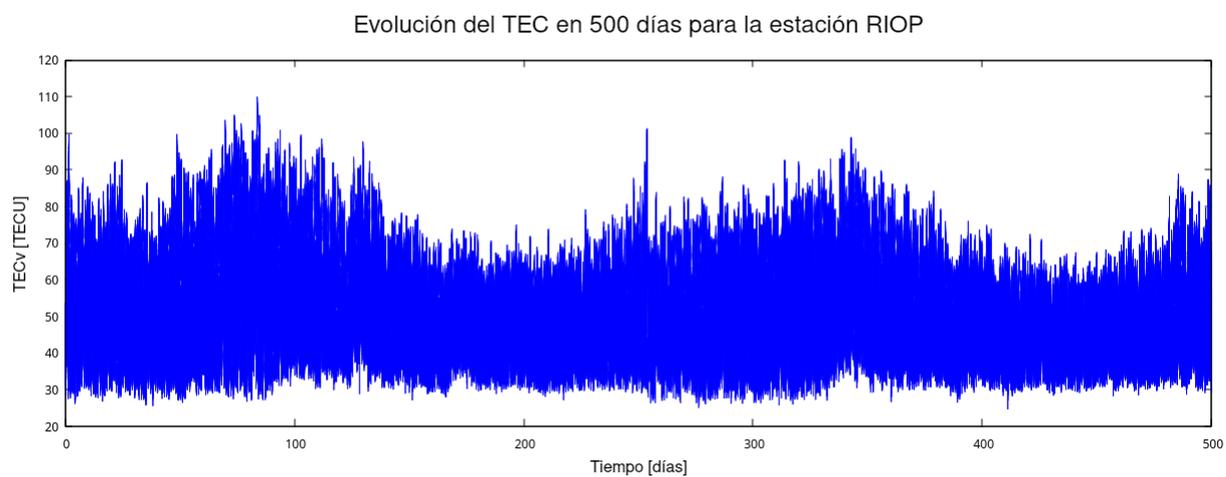


Figura 2.17: Evolución del TEC en 500 días para la estación RIOP

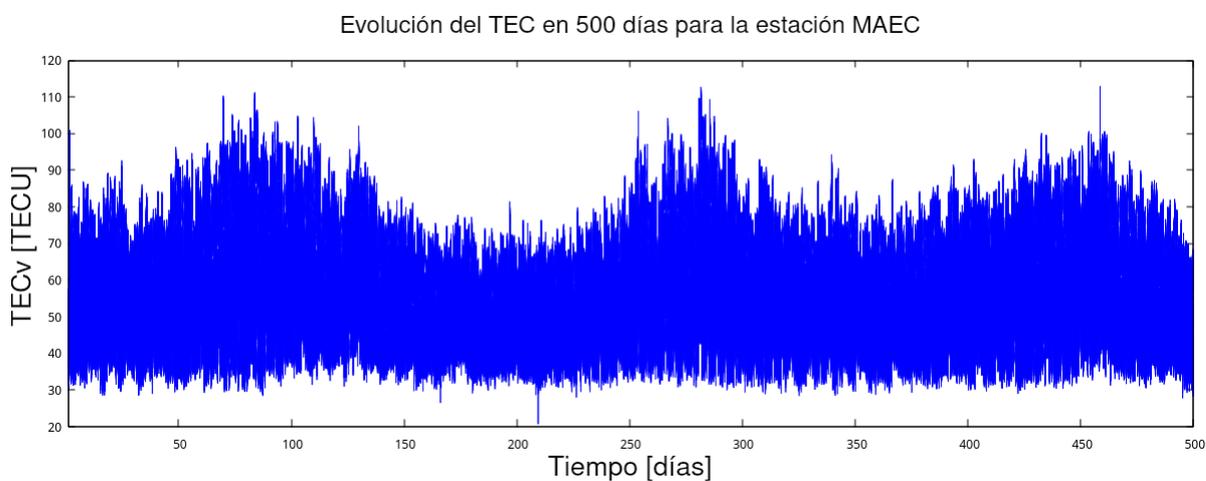


Figura 2.18: Evolución del TEC en 500 días para la estación MAEC

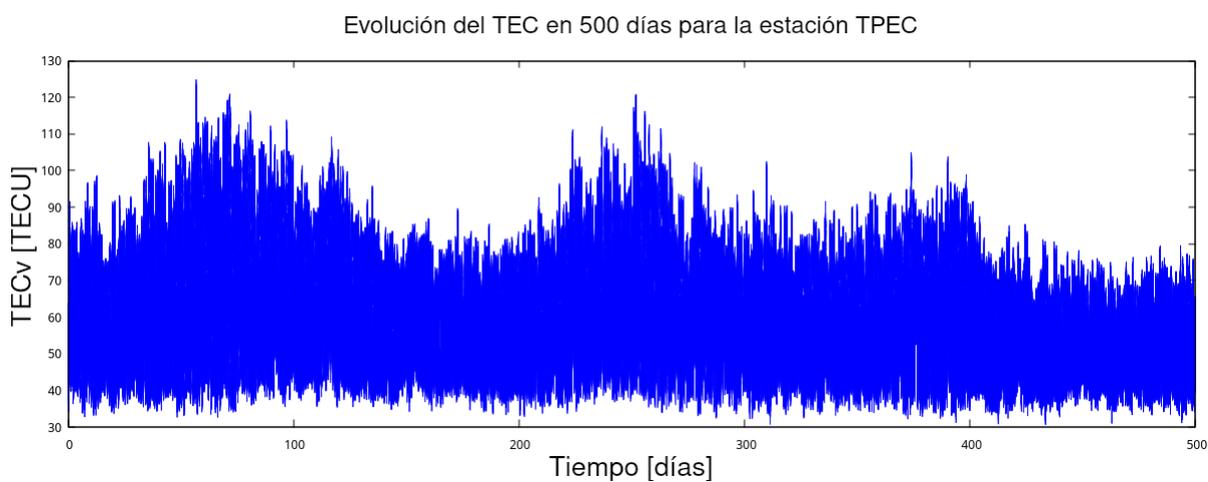


Figura 2.19: Evolución del TEC en 500 días para la estación TPEC

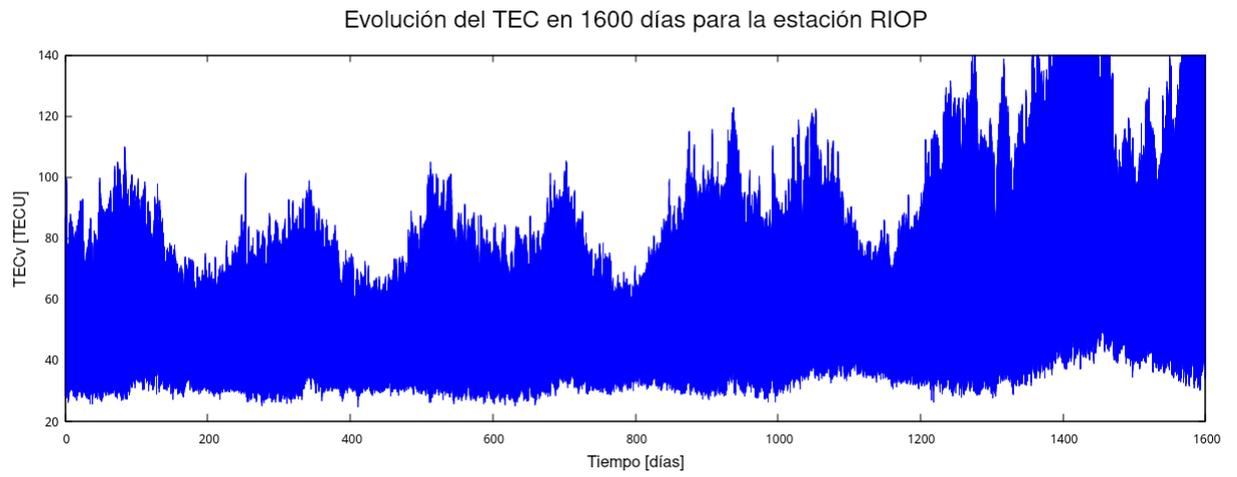


Figura 2.20: Evolución del TEC en 1600 días para la estación RIOP

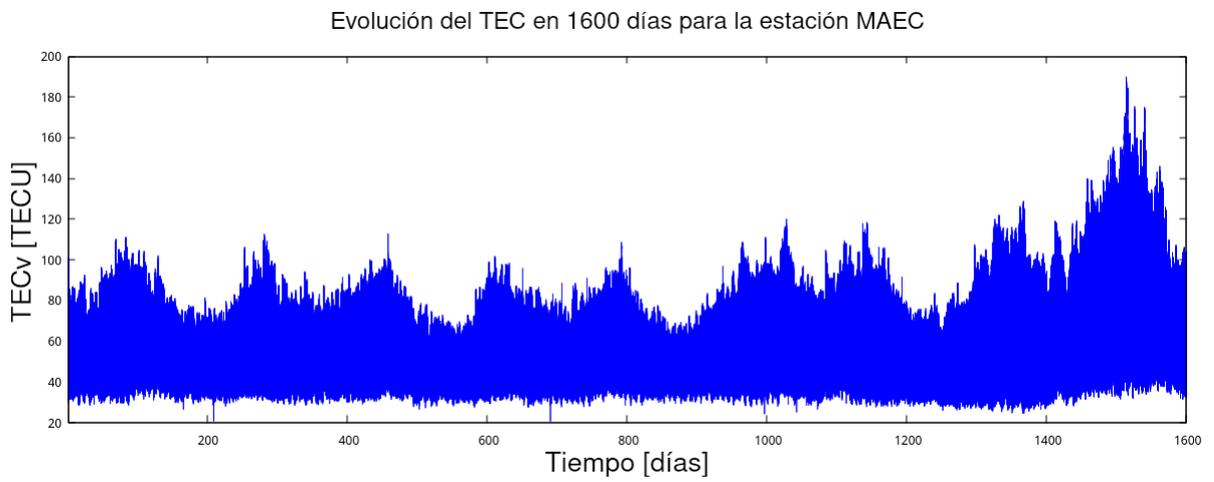


Figura 2.21: Evolución del TEC en 1600 días para la estación MAEC

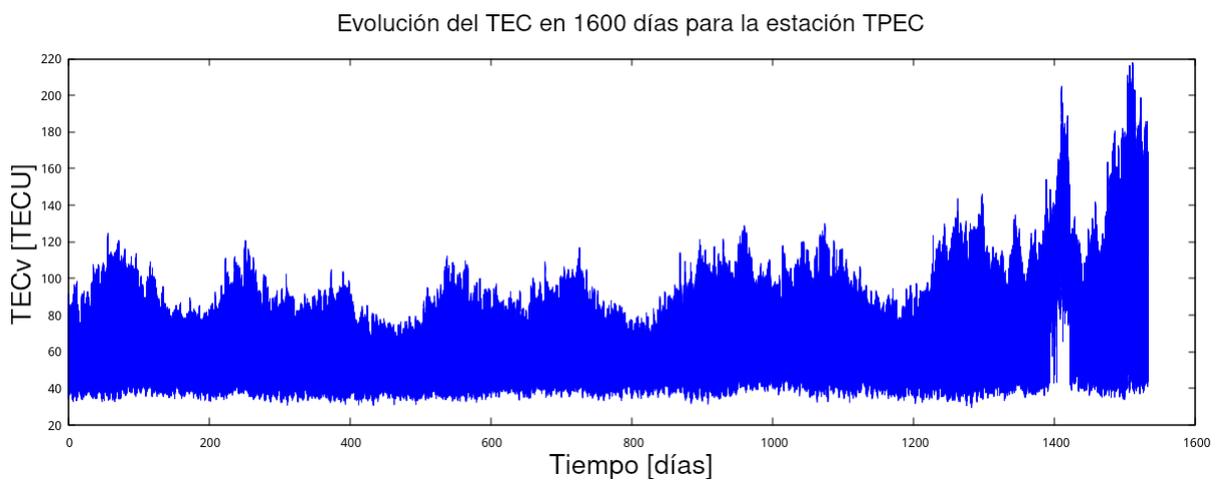


Figura 2.22: Evolución del TEC en 1600 días para la estación TPEC

Aquí se puede ver claramente que en el paso del tiempo hay un evento cíclico diario, y se pueden apreciar a su vez más eventos cíclicos menos marcados, en la escala de las decenas o centenas de días que requieren un análisis mas detallado.

Antes de profundizar el análisis sobre los periodos observados, se llevó a cabo un proceso de tratamiento y filtrado de datos para garantizar confiabilidad de los datos. Se depuraron los datos para eliminar posibles errores o valores atípicos que pudieran afectar el análisis posterior como valores de TEC nulos o exageradamente altos que pueden deberse a fallos en las antenas que generen errores en las mediciones.

Para determinar, analizar y estudiar posibles periodicidades se utilizarán herramientas como transformadas de Fourier, análisis de tendencias con medias móviles y se desarrollará un programa en Python que ubique los máximos locales, calcula la diferencia de tiempo entre los máximos adyacentes y haga un promedio de estos.

La manera en la que este programa opera es que evalúa valor a valor si un dato de TEC era mayor que un número de valores anteriores (en un intervalo de n datos), si se cumple esta condición, el dato es considerado un máximo local. Sin embargo, para evitar el reconocimiento de máximos locales en regiones con variaciones pequeñas, se estableció una ventana suficientemente grande para que no considere espacios donde existan mas de un máximo local o donde no exista ninguno.

Además, para periodicidades grandes, con el fin de facilitar el análisis y evitar la presencia de patrones de períodos más cortos, por ejemplo, el ciclo diario del TEC, se tomaron unos pocos datos de TEC por día, según requiera el caso entre 1 y 4. Por ejemplo cuando se tomó 1 dato por día, se seleccionó 1 dato cada 2880, ya que en un día con mediciones cada 30 segundos se tienen 2880 mediciones.

2.3. Análisis de datos astronómicos con el software NRAO CASA

La segunda parte de este proyecto que funciona como parte complementaria es un análisis cualitativo de datos astronómicos que se descargaron del *archivo de datos* de NRAO (National Radio Astronomy Observatory) de tres cuerpos celestes: 3C-129, 3C-295 y 3C-286. Estos cuerpos celestes son fuentes de radio identificadas en el catálogo **Third Cambridge Catalogue of Radio Sources (3C)**. Cada uno de ellos emite en el rango de radiofrecuencia.

Es muy importante que sean fuentes radio, pues, como se explicó anteriormente, el tamaño de las longitudes de onda es suficientemente grande para interactuar con las partículas cargadas de la ionosfera y esto generar retardos ionosféricos.

Los cuerpos celestes estudiados son:

1. **3C-129**. Este es un cuerpo celeste catalogado como un cuásar, un objeto astronómico distante y luminoso que, en este caso, tiene dos jets característicos. Estructuras alargadas de material que son expulsadas a grandes velocidades desde su núcleo activo. Estos jets son un indicio de la presencia de un agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia anfitriona. Los cuásares son núcleos galácticos activos alimentados por agujeros negros supermasivos en el centro de galaxias. Emiten radiación en varias longitudes de onda, incluida la radio, sobre la cual se hacen los análisis y calibraciones.[16]

A este cuásar se le aplicó el TEC del Ecuador, debido a que al tener 2 jets es más apreciable el efecto que la interacción con la ionosfera puede causar.

El objetivo de este análisis es hacer correcciones atmosféricas a los

datos de una fuente conocida utilizando el TEC del Ecuador, por ese motivo se utilizó como fuente el cuerpo celeste 3C129 ya que es una galaxia cuáasar conocida y estudiada, se tienen los datos observados desde el observatorio astronómico Nacional de México ubicado en la longitud -107.37.09.0 y latitud +33.54.30.0.

El primer objetivo es utilizar la señal captada por el observatorio astronómico nacional de México y procesarla en el software NRAO CASA de modo que se obtenga una señal depurada de los efectos ocasionados por la atmósfera. Posteriormente, como segundo objetivo es generar una imagen de 3C129 como si se hubiera observado desde el Ecuador con el TEC de las estaciones analizadas.

2. **3C-295** Este cuerpo celeste está identificado como el núcleo dominante de un cúmulo de galaxias. Estos cúmulos son estructuras masivas compuestas por numerosas galaxias interconectadas. La galaxia 3C-295 igualmente emite en radio.

3. **3C-286** Esta fuente, también conocida como J1331+3030, es otro cuáasar importante, sin embargo, dada la orientación del cuerpo celeste, no se pueden observar 2 jets como en el caso de 3C129. Se utiliza frecuentemente como calibrador en observaciones de radio debido a su brillo y emisión estable.

Este cuáasar, junto con la radio galaxia 3C295 se utilizaron para obtener resultados cualitativos de los cuerpos calibrados a fin de entender el software NRAO CASA.

2.3.1. Calibraciones de datos y obtención de resultados

Se utilizó un ordenador portátil para realizar las calibraciones, por ese motivo, las imágenes se limitan a las capacidades de almacenamiento y procesamiento del ordenador.

Para calibrar los datos de un cuerpo celeste utilizando la herramienta NRAO CASA (Common Astronomy Software Applications), se sigue un

proceso detallado que involucra varias etapas de calibración. La calibración del TEC (Total Electron Content) es una parte importante de este proceso. A continuación, se describirá paso a paso el procedimiento general:[8]

- **Preparación de los datos:** Antes de comenzar la calibración, es necesario preparar los datos observacionales. Esto implica la descarga de los datos brutos del observatorio y su conversión a un formato adecuado para su procesamiento con CASA.
- **Inspección y selección de datos:** En esta etapa, se realiza una inspección visual de los datos para identificar cualquier anomalía o interferencia. Se seleccionan los intervalos de tiempo y frecuencia de interés, descartando los datos de mala calidad o con interferencias significativas.
- **Calibración primaria:** La calibración primaria consiste en aplicar las correcciones iniciales a los datos brutos. Esto incluye la corrección de la respuesta del receptor, la conversión de unidades y la corrección de la respuesta del sistema atmosférico. Para la calibración atmosférica, se utiliza un modelo atmosférico estándar que tiene en cuenta los efectos del TEC.
- **Corrección del TEC:** La corrección del TEC es esencial para mitigar los efectos de la ionosfera en las observaciones astronómicas. Para realizar esta corrección, se utilizan técnicas que involucran la estimación y compensación de la dispersión ionosférica. CASA proporciona herramientas como "fixplanetsz" "setjy" que permiten realizar esta corrección. Estas herramientas utilizan modelos ionosféricos y datos GPS para estimar el TEC y aplicar la corrección a los datos.
- **Calibración de ganancia:** La calibración de ganancia es necesaria para corregir las variaciones en la sensibilidad del sistema de observación. Se utilizan fuentes de calibración conocidas, como fuentes

de radio de intensidad estable, para determinar la respuesta de ganancia del sistema y aplicar las correcciones correspondientes a los datos.

- **Calibración de bandas laterales:** Las bandas laterales son un efecto no deseado que puede afectar las observaciones de radio. Para corregir este efecto, se utiliza la técnica de calibración de bandas laterales, que implica comparar las mediciones de diferentes polarizaciones y aplicar correcciones adecuadas.
- **Calibración final y generación de imágenes:** Una vez que se han aplicado todas las calibraciones necesarias, se realiza una calibración final para refinar los parámetros de calibración. Luego, se generan imágenes utilizando técnicas de imagen astronómica estándar, como Fourier Transform Imaging, para visualizar y analizar los datos calibrados.

Para el tratamiento de datos astronómicos utilizando el software NRAO CASA se descargaron los datos de la página oficial de CASA junto con las versiones 4.7.0, 5.8.0 y 6.2.1 debido a que el código para interactuar con el software cambia de versión en versión y para realizar las calibraciones fue necesario utilizar algunas versiones de casa dependiendo su compatibilidad con ciertos comandos.[8]

Los comandos utilizados para hacer las calibraciones son los siguientes:

1. *importasdm(...)*

Este comando se utiliza para importar los datos en formato ASDM (Archivo de Definición del Sistema de Medición) a un formato compatible con CASA, como el formato de conjunto de mediciones (Measurement Set).

2. *listobs_file = listobs(...)*

Este comando genera un archivo de texto con un resumen detallado de las observaciones contenidas en el conjunto de mediciones. Proporciona información sobre las fuentes observadas, las configuraciones del telescopio, las ventanas espectrales y otros parámetros relevantes.

3. *listobs_logger = listobs(...)*

Al igual que el comando anterior, este genera un resumen de las observaciones, pero en lugar de guardar los resultados en un archivo de texto, los muestra en la ventana de registro (log) de CASA.

4. *flagdata(...)*

Este comando se utiliza para aplicar banderas a los datos. Puede ser utilizado para eliminar mediciones afectadas por interferencias, valores atípicos u otros problemas. Se pueden aplicar banderas manuales o automáticas, y se pueden especificar diferentes criterios de flagging.

5. *hanningsmooth(...)*

Este comando realiza un suavizado de los datos utilizando una función de ventana de Hanning. El suavizado de Hanning ayuda a reducir el fenómeno de Gibbs y mejora la calidad de los datos.

6. *gencal(...)*

Este comando se utiliza para generar una tabla de calibración que contiene información sobre los valores de calibración para diferentes parámetros, como las amplitudes y las fases de las antenas. La tabla de calibración se utiliza posteriormente en los pasos de calibración de los datos.

7. *imview(...)*

Este comando permite visualizar imágenes generadas a partir de los

datos. Permite explorar y analizar visualmente las imágenes y realizar ajustes de visualización según sea necesario.

8. *plotms(...)*

Este comando permite visualizar gráficamente los datos del conjunto de mediciones. Puede mostrar información como las amplitudes, flujos, las fases en diferentes configuraciones.

Correcciones del TEC

Estos pasos involucran el uso de comandos y herramientas específicas para corregir los efectos del Contenido Electrónico Total (TEC) en los datos observacionales. Estas correcciones se realizan para mitigar los efectos de la ionosfera en las mediciones.

9. *fromcasatasks.privateimporttec_maps*

Esta línea de código importa una función específica (*tec_maps*) del módulo *casatasks.private* para generar mapas del TEC.

10. *tec_image, tec_rms_image, plotname = tec_maps.create(...)*

Este comando genera los mapas del TEC utilizando los datos observacionales y los parámetros especificados. Los mapas del TEC proporcionan información sobre las variaciones de densidad electrónica en la ionosfera.

11. *gencal(...)*

Este comando se utiliza nuevamente para generar una tabla de calibración, pero en este caso se genera específicamente para las correcciones del TEC.

Flagging automático

Estos pasos implican la aplicación de banderas automáticas a los datos observacionales para eliminar mediciones afectadas por problemas técnicos o interferencias.

12. *summary*₁ = *flagdata*(...)

Este comando aplica las banderas automáticas a los datos y genera un resumen de las banderas aplicadas. El resumen muestra estadísticas sobre las banderas aplicadas en función de diferentes criterios, como el número de banderas por escaneo.

13. *axis* = 'scan'

```
forid, statsinsummary1[axis].items() :  
print(...)
```

Estas líneas de código imprimen en pantalla las estadísticas de flagging por escaneo, mostrando el ID del escaneo y las estadísticas correspondientes.

14. *flagdata*(...)

Este comando realiza una segunda aplicación de banderas a los datos. Puede ser utilizado para aplicar banderas adicionales basadas en criterios específicos.

15. *summary*₂ = *flagdata*(...)

Al igual que en el paso anterior, este comando genera un nuevo resumen de las banderas aplicadas después de la segunda aplicación de banderas.

16. *axis* = 'scan'

```
forvalue, statsinsummary2[axis].items() :  
old_stats = summary1[axis][value]  
print(...)
```

Estas líneas de código imprimen en pantalla las estadísticas de flagging después de la segunda aplicación de banderas, mostrando las diferencias entre las estadísticas de las dos aplicaciones de banderas.

17. *plotms*(...)

Este comando visualiza nuevamente los datos del conjunto de me-

diciones después de la aplicación de las banderas. Permite evaluar visualmente los efectos de las banderas y verificar la calidad de los datos.

18. *gaincal(...)*

Este comando se utiliza para calibrar las ganancias de las antenas. Calcula los factores de corrección necesarios para ajustar las amplitudes y las fases de las mediciones a los valores reales.

19. *bandpass(...)*

Este comando se utiliza para realizar la calibración del paso de banda. Ajusta las respuestas de frecuencia de las antenas para obtener una respuesta de paso de banda más uniforme.

20. *applycal(...)*

Este comando aplica las tablas de calibración generadas previamente a los datos del conjunto de mediciones. Realiza las correcciones de calibración de acuerdo con los valores especificados en las tablas de calibración.

Calibración de densidad de flujo

Estos pasos implican la calibración de la densidad de flujo de las fuentes observadas. Se ajustan los valores de calibración para obtener mediciones más precisas de la densidad de flujo de las fuentes.

21. *clearcal(...)*

Este comando se utiliza para eliminar las tablas de calibración existentes y restablecer el estado de calibración inicial.

22. *setjy(...)*

Este comando se utiliza para establecer los valores de densidad de flujo de las fuentes de calibración. Ajusta los valores de calibración para que coincidan con los valores conocidos de densidad de flujo

de las fuentes.

Calibración de retardos y paso de Banda

Estos pasos implican la calibración de los retardos y el paso de banda de las antenas. Se ajustan los valores de calibración para corregir los efectos del retardo de fase y las respuestas de frecuencia de las antenas.

23. *gaincal(...)*

Este comando se utiliza nuevamente para calibrar las ganancias de las antenas, pero en este caso se enfoca en los retardos y el paso de banda.

24. *bandpass(...)*

Este comando se utiliza nuevamente para realizar la calibración del paso de banda después de la calibración de los retardos.

Calibración de ganancia

25. *gaincal(...)*

Este paso final implica la calibración de las ganancias de las antenas para obtener mediciones precisas de las amplitudes y las fases de las fuentes observadas.

La función *tclean* se utiliza para realizar la limpieza y la reconstrucción de imágenes a partir de datos, en esta imagen se especifica el nombre del archivo de datos visuales que se utilizará para realizar la limpieza y reconstrucción de la imagen, también Define el nombre base para los archivos resultantes, especifica el tamaño de cada muestreo de la imagen reconstruida en unidades angulares y Define el tamaño de la imagen en píxeles. Esta función también especifica el algoritmo de deconvolución que va a utilizar el software CASA, en este caso es el *mtmfs*. Este algoritmo realiza una descomposición en funciones de modelos múltiples. Esta función también

define otros parámetros menos relevantes para la reconstrucción de la imagen.[8]

Para iniciar el proceso de análisis, se llevaron a cabo las calibraciones iniciales de los cuerpos celestes 3C-129, 3C-286 y 3C-295 utilizando los comandos y herramientas proporcionados por el software NRAO CASA. De este modo se obtuvo la señal pura, eliminando la mayoría de las contaminaciones que tiene por pasar por la atmósfera, entre estas, incluido la corrección de los retardos ionosféricos utilizando el TEC del Ecuador.

Posteriormente, de entre los cuerpos celestes estudiados, se escogió enfocar un análisis cualitativo en el cuásar 3C-129. La elección se basó en la naturaleza del cuerpo celeste, pues, visualmente se aprecian 2 jets y eso facilita la comprensión visual para poder apreciar los efectos de la ionosfera, en particular la atenuación de la imagen producida por los retardos ionosféricos causados por el TEC del Ecuador.[16][8]

Capítulo 3

Resultados, conclusiones y recomendaciones

3.1. Periodos hallados en el análisis de datos del TEC sobre el Ecuador

3.1.1. Periodo de 167.196 \pm 35.385177 días

Para identificar patrones periódicos y máximos locales en la serie temporal de TEC, se aplicó una técnica de análisis de tendencias utilizando la media móvil y análisis de máximos locales de una función. La media móvil es una herramienta útil para suavizar una serie temporal y resaltar patrones a largo plazo. Se utilizó una ventana de entre 50 y 100 datos para calcular la media móvil según requiera visualmente el caso, pues las estaciones están distantes entre si y el TEC no es idéntico entre ellas, requiriendo un análisis individual.

Esto permitió identificar las fluctuaciones más significativas y relevantes en la serie temporal del TEC.

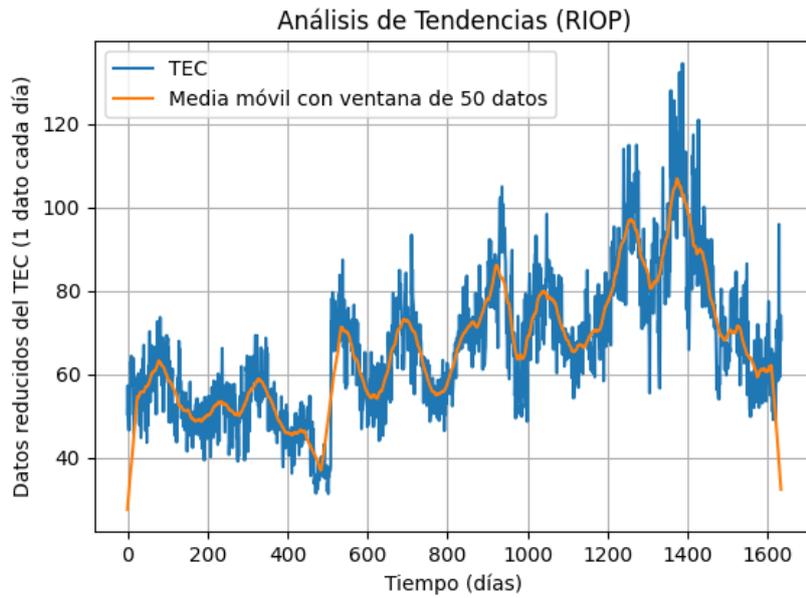


Figura 3.1: Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación RIOP

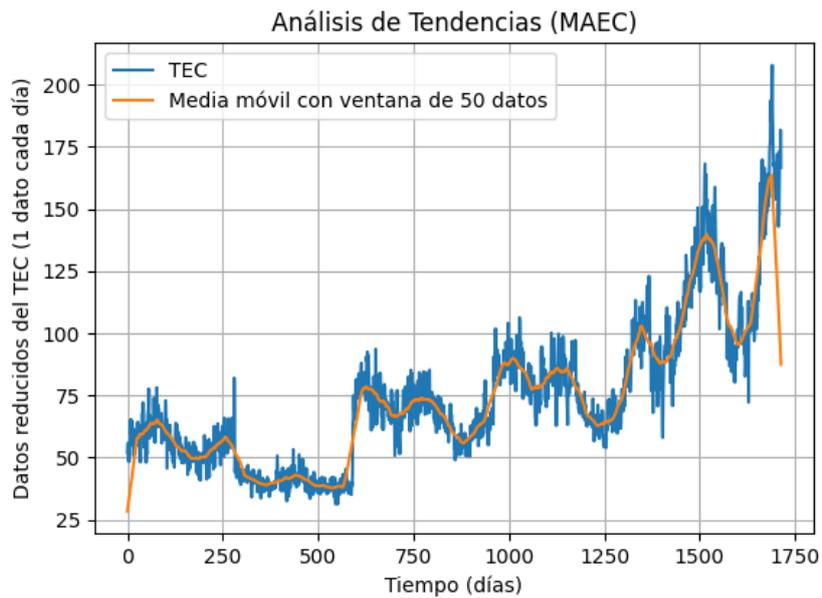


Figura 3.2: Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación MAEC

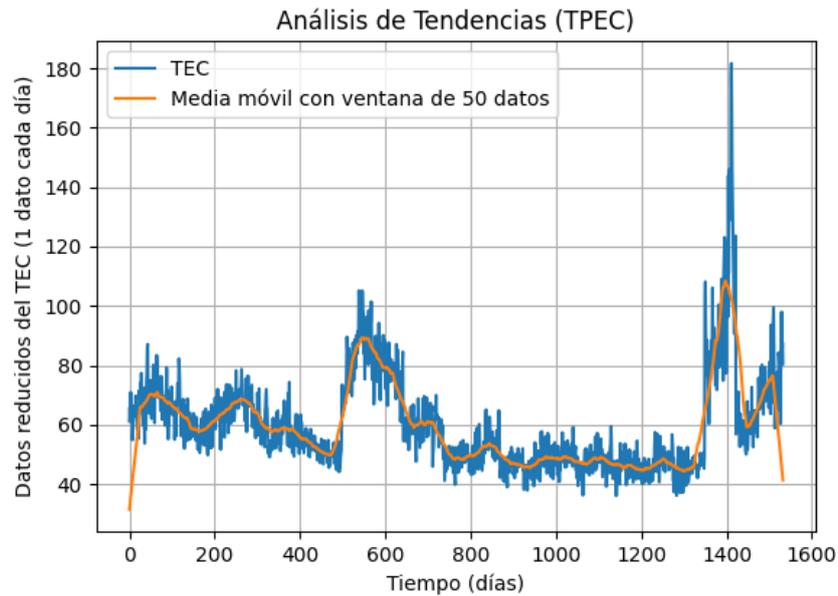


Figura 3.3: Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación TPEC

En estas medias móviles se pueden identificar claramente máximos locales a lo largo de la curva de evolución respecto al tiempo. Sin embargo, es visible que existe una desviación estándar bastante significativa.

Tras identificar los máximos locales en la serie temporal de TEC y calcular el período promedio entre ellos para cada estación. Se determinó la existencia de un período de larga duración. Este resultado es de gran relevancia para el estudio de las variaciones temporales en el TEC y su influencia en las condiciones atmosféricas y de comunicaciones.

Del análisis de los máximos locales se obtuvieron los siguientes resultados:

Estación	Periodo
RIOP	163.25 +/- 44.488774 días
MAEC	176.733 +/- 26.857318 días
TPEC	160.7222 +/- 32.747749 días
TOTAL	167.196 +/- 35.385177 días

Cuadro 3.1: Cálculo del periodo observado, para el cálculo total se utilizaron todas las distancias entre los máximos, tomando en cuenta que se encontró entre 8 y 9 máximos locales por estación

El análisis detallado de los datos del TEC en las estaciones RIOP, MAEC y TPEC durante 5 años ha permitido identificar patrones periódicos y máximos locales en la serie temporal. El uso de técnicas estadísticas y análisis de datos ha proporcionado una comprensión más profunda de las variaciones temporales en el TEC en el Ecuador. Los resultados obtenidos son de gran relevancia para el estudio del clima espacial e ionosférico así como para aplicaciones en las comunicaciones, localización por satélite y estudio de cuerpos celestes.

Posibles causas para el periodo 167.196 +/- 35.385177 días

El periodo de 167.196 +/- 35.385177 días observado en el TEC en la región ecuatorial puede tener diversas causas, algunas de las cuales podrían estar relacionadas con los solsticios y equinoccios, pues, la posición del Sol en el cielo varía y tiene un efecto directo en la radiación solar que llega a la atmósfera terrestre en esta región ecuatorial. Durante los equinoccios, los rayos solares inciden directamente sobre el Ecuador, lo que podría influir en la ionización de la atmósfera superior y, por lo tanto, en el TEC. De manera similar, los solsticios marcan momentos en los cuales los rayos solares inciden más perpendicularmente sobre el trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio, lo que también podría tener un impacto en la ionización y en el comportamiento del TEC.[14]

Particularmente, habría una tendencia a ver mayores concentraciones de electrones en la ionosfera alrededor de las fechas del 20 de marzo y del 22 de septiembre.

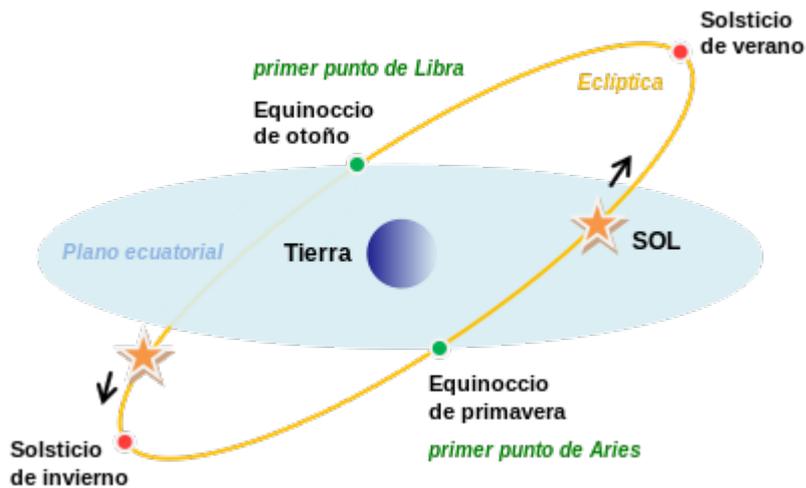


Figura 3.4: Equinoccios con la Tierra como centro de referencias

De igual modo, este comportamiento puede estar ligado a fenómenos atmosféricos y astronómicos característicos de la zona. Uno de los factores importantes es la ubicación geográfica en la zona ecuatorial, que está dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Esta área experimenta cambios estacionales marcados debido a la variación en los vientos y la convergencia de masas de aire cálido y frío.[14]

Además, la presencia de vientos cálidos durante julio y fríos durante enero en la ZCIT podría contribuir a variaciones en la densidad de la atmósfera superior, lo que a su vez podría afectar la distribución de electrones y el TEC.

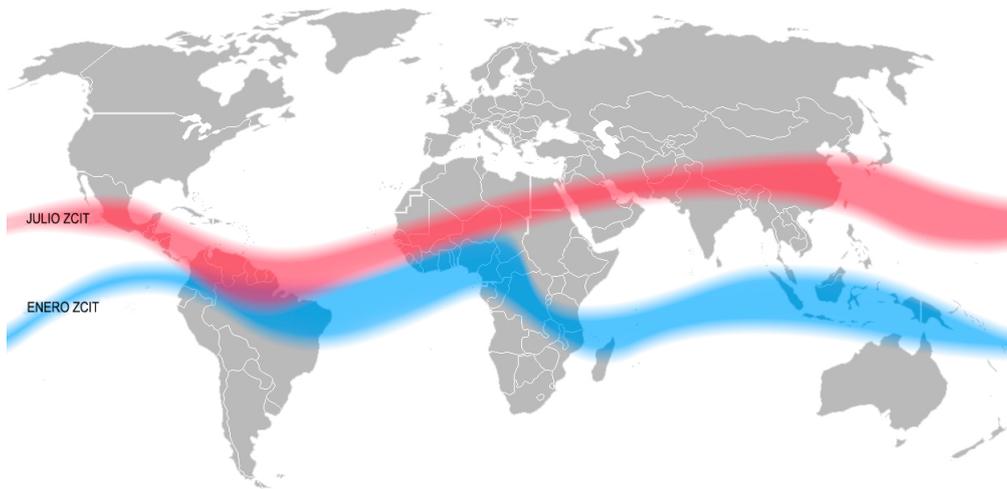


Figura 3.5: Zona de Convergencia InterTropical

El periodo observado en el TEC podría estar relacionado con la ubicación geográfica en la Zona de Convergencia Intertropical, la influencia de los solsticios y equinoccios, así como con los vientos y fenómenos meteorológicos característicos de la región. La gran desviación estándar en los datos resalta la complejidad de los factores que contribuyen a la variabilidad del TEC así como el tiempo que separa los distintos fenómenos. Esto destaca la necesidad de un análisis más detallado para comprender completamente su comportamiento.

3.1.2. Periodo de 17.203 \pm 4.888 días

En este caso, se consideraron intervalos de 100 días y para identificar comportamientos periódicos en estos intervalos de tiempo, fueron de utilidad las técnicas de análisis de tendencias utilizando la media móvil y análisis de máximos locales. En este caso se utilizó una ventana de entre 5 y 10 datos para calcular la media móvil.

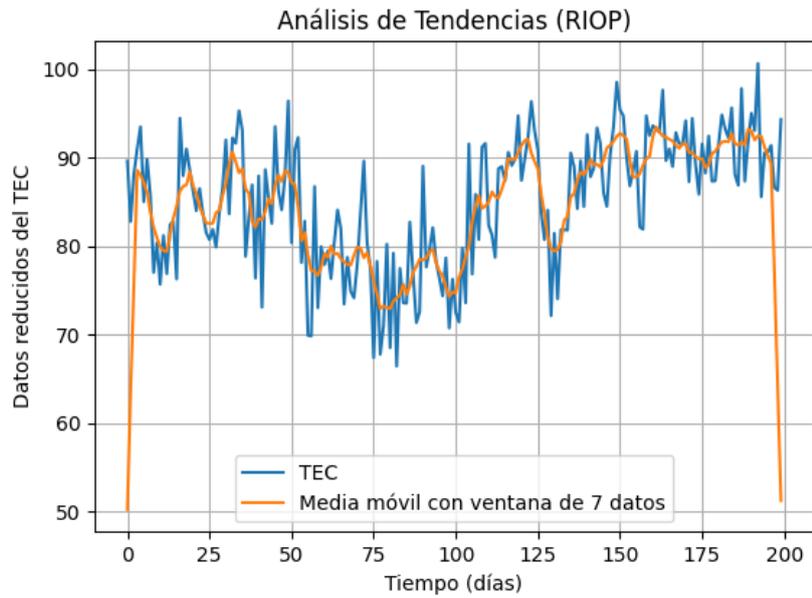


Figura 3.6: Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación RIOP

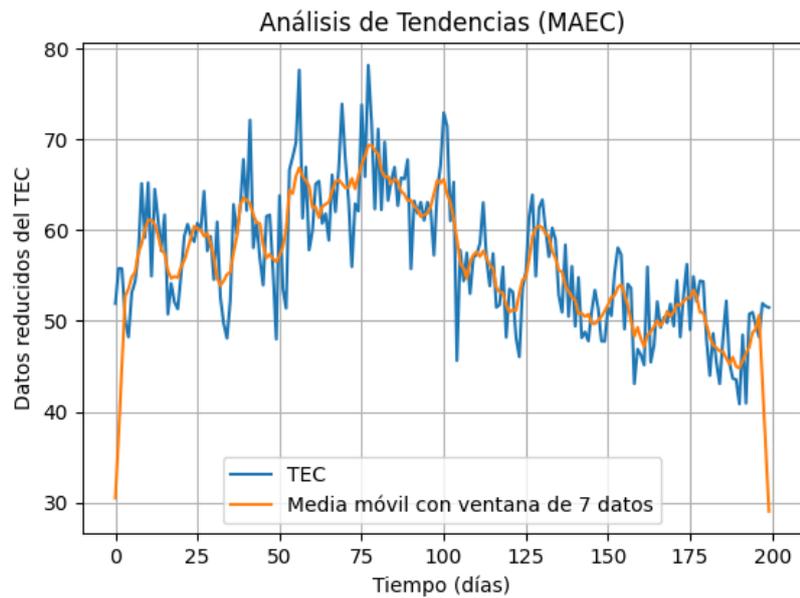


Figura 3.7: Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación MAEC

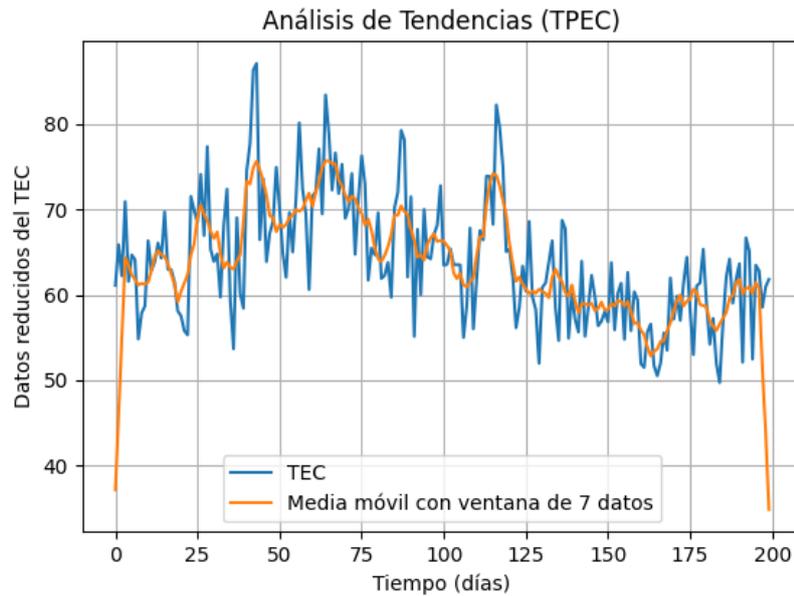


Figura 3.8: Análisis de tendencia e identificación de máximos locales para la estación TPEC

En estas medias móviles se pueden identificar máximos locales a lo largo de la curva de evolución temporal. Sin embargo, es visible que existe una desviación estándar bastante significativa.

Tras identificar los máximos locales en la serie temporal de TEC y calcular el período promedio entre ellos para cada estación. Se determinó la existencia de un período de media duración. Este resultado aporta al entendimiento de la dinámica atmosférica y el estudio del TEC.

Del análisis de los máximos locales se obtuvieron los siguientes resultados:

Estación	Periodo
RIOP	16.82 \pm 5.9668 días
MAEC	18.00 \pm 3.31662 días
TPEC	16.95 \pm 4.81114 días
TOTAL	17.203 \pm 4.8880 días

Cuadro 3.2: Cálculo del periodo observado. Para el cálculo total se utilizaron todas las distancias entre los máximos, tomando en cuenta que se encontró entre 10 y 11 máximos locales por estación

Posibles causas para el periodo 17.203 \pm 4.888 días

Este periodo tiene una desviación estándar bastante significativa y eso es porque hay muchas posibles causas para la existencia del mismo. Entre ellas destacan periodos o eventos de corta duración como el periodo lunar o fenómenos atmosféricos como las ondas de Rossby.

Es bastante consistente que la amplitud de este periodo no sea igual de grande y notoria, como lo son las amplitudes del periodo de cerca de 167 días o del periodo diario, esto se debe a que las posibles causas para el mismo tienen efectos relativamente pequeños en comparación con otros factores, como la actividad solar y las condiciones climáticas grandes.

Uno de los principales efectos de la Luna en la ionosfera está relacionado con su influencia gravitacional ya que esta es la responsable de las mareas, que a su vez, presentan un impacto en el clima a través de su influencia en las corrientes oceánicas, la distribución del calor en los océanos o la humedad climática.

Aunque las mareas en sí mismas no generan cambios climáticos drásticos, su interacción con otros procesos oceánicos y atmosféricos puede tener efectos en la temperatura de la atmósfera o su dinámica en general.

Las ondas de Rossby son eventos ondulatorios en la atmósfera y los océanos que se generan debido a la rotación de la Tierra y la variación en la velocidad de los vientos y las corrientes. Las ondas de Rossby desempeñan un papel importante en la distribución del calor y la humedad en la atmósfera y los océanos, influyendo en los patrones climáticos.

De ese modo el ciclo de alrededor de 17 días puede estar ligado a estos dos factores y seguramente a muchos eventos atmosféricos mas.

3.1.3. Periodo de 1 día

Este periodo es el mas claro, para hallarlo el único análisis necesario fue una transformada de Fourier para encontrar las frecuencias predominantes.

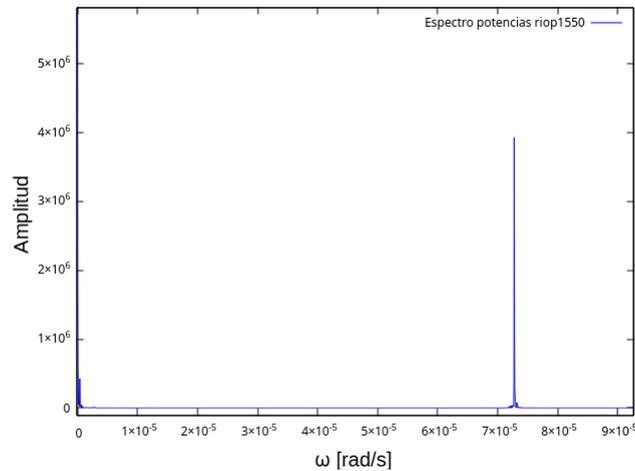


Figura 3.9: Espectro de potencias

Se halló una frecuencia muy predominante en:

$$7,27 \left[\frac{rad}{s} \right] \frac{3600 \times 24}{2\pi} \left[\frac{1}{días} \right] = 0,9996967 [1/días] \approx 1 [1/días] \quad (3.1)$$

Esto nos dice que existe un evento periódico cada día, como era esperado.

Causa para el periodo 1 día

La causa de este evento periódico diario esta en las horas con presencia de sol, pues, aumentara el TEC por la temperatura de la atmósfera y la incidencia de la energía solar ionizando las partículas. Por otro lado en la noche, se espera un comportamiento de reducción en el TEC.

3.2. Procesamiento de imágenes de cuerpos celestes que emiten en radiofrecuencias

Primero, se realizaron las calibraciones para los cuerpos celestes 3C-129, 3C-295 y 3C-286, de las que fue posible obtener imágenes limpias de los retardos ionosféricos, es decir, señales *puras*.

Al momento de hacer la calibración, fue posible obtener ciertas imágenes que dan un criterio del camino que se está siguiendo en la calibración, como por ejemplo, una gráfica de *Amplitud vs. Frecuencia Baseline* es una representación gráfica de la relación entre la amplitud de la señal medida por una antena de radiotelescopio y la frecuencia de la señal. El término *Baseline* hace referencia a las separaciones físicas entre antenas en una matriz interferométrica, pues son múltiples antenas que se combinan para simular una antena más grande y poder obtener detalles con mayor resolución en las imágenes astronómicas. [8][16]

La imagen siguiente nos ayuda a entender como la señal del cuerpo celeste se comporta en un rango de frecuencias, es decir, cuales son las frecuencias predominantes mostradas por los picos.

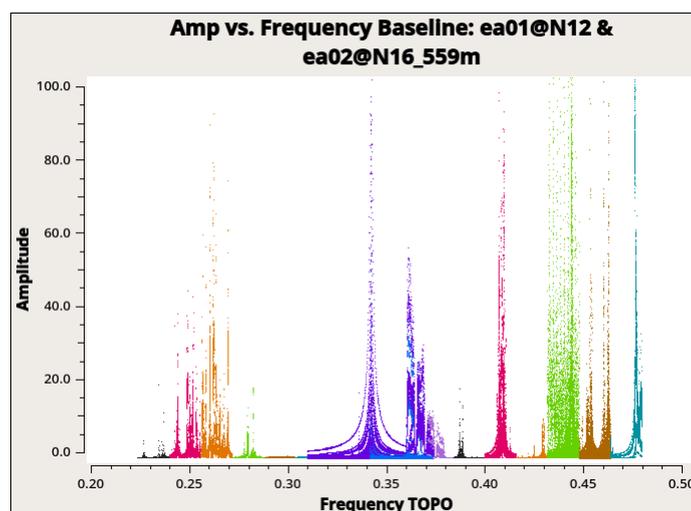


Figura 3.10: Amplitud vs. Frecuencia

Se realizó una calibración de los datos de la radio galaxia 3C-286, y se obtuvo una imagen reduciendo los retardos ionosféricos.

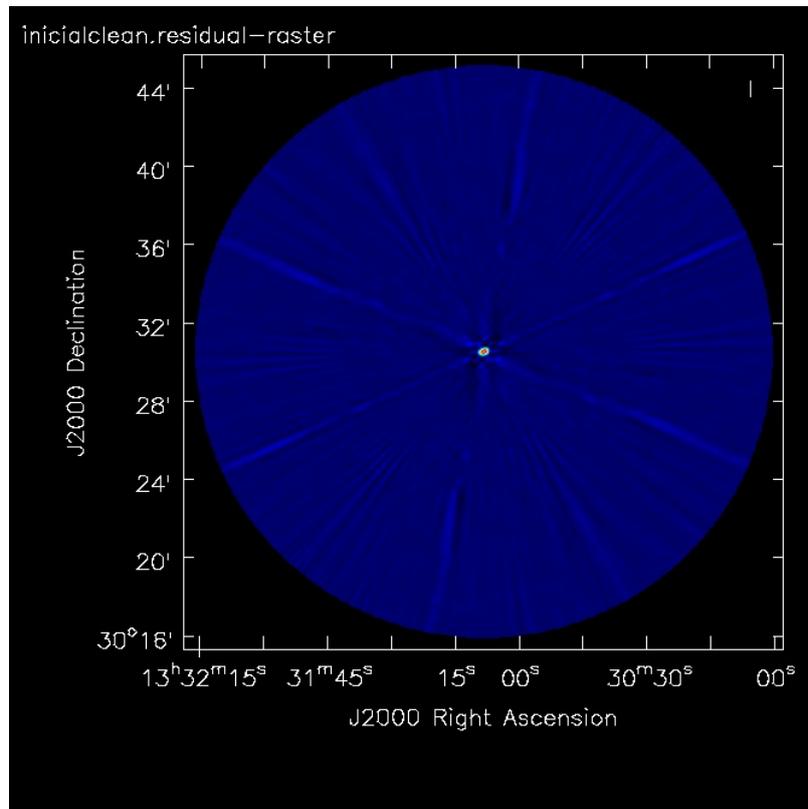


Figura 3.11: 3C-286

Se puede ver la zona en la que se encuentra la distante radio galaxia, una intensidad en el flujo mucho mayor a la altura de los 30°32' y las 13h31m15s, donde se ubica la radio galaxia.

El flujo se expresa en unidades llamadas Janski [Jy], también es posible expresarlo en $(W/m^2/Hz)$.

Para la calibración de la radio galaxia 3C-295 se siguió un proceso similar, obteniéndose las siguientes imágenes.

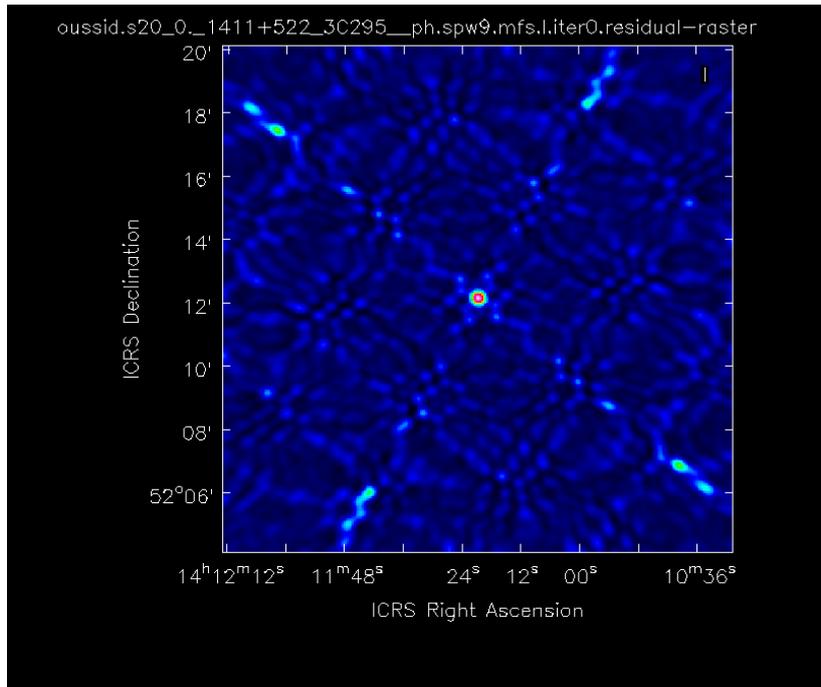


Figura 3.12: Calibración de los datos astronómicos de 3C-295

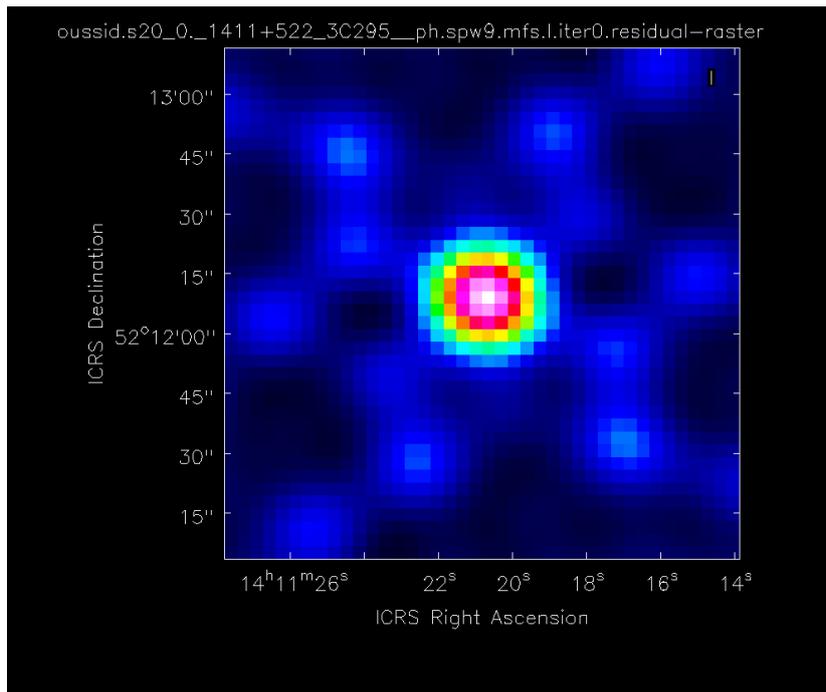


Figura 3.13: Datos astronómicos de 3C-295 ampliados

Así también, se realizó la limpieza y corrección de datos de la galaxia 3C-129, obteniéndose una imagen de la señal pura como si no hubiese pasado por la atmósfera. Al graficar el flujo de esta galaxia se está repre-

sentando la variación de cantidad de energía que llega desde la galaxia desde cada zona en grados y horas.[8]

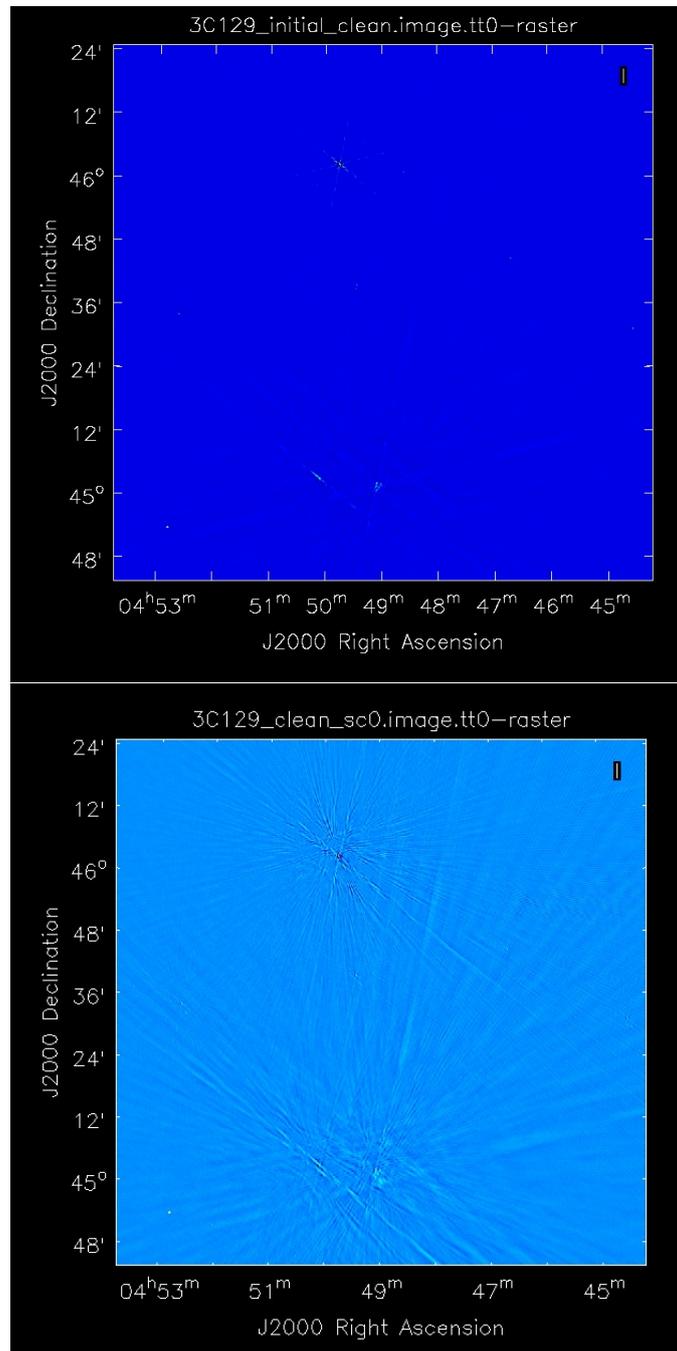


Figura 3.14: Calibración de los datos astronómicos de 3C-129 y la señal pura junto con el retardo ionosférico ocasionado por el TEC del Ecuador

Realizando una ampliación únicamente a la zona donde se encuentra el cuásar, se pueden ver los dos lóbulos o jets del mismo.

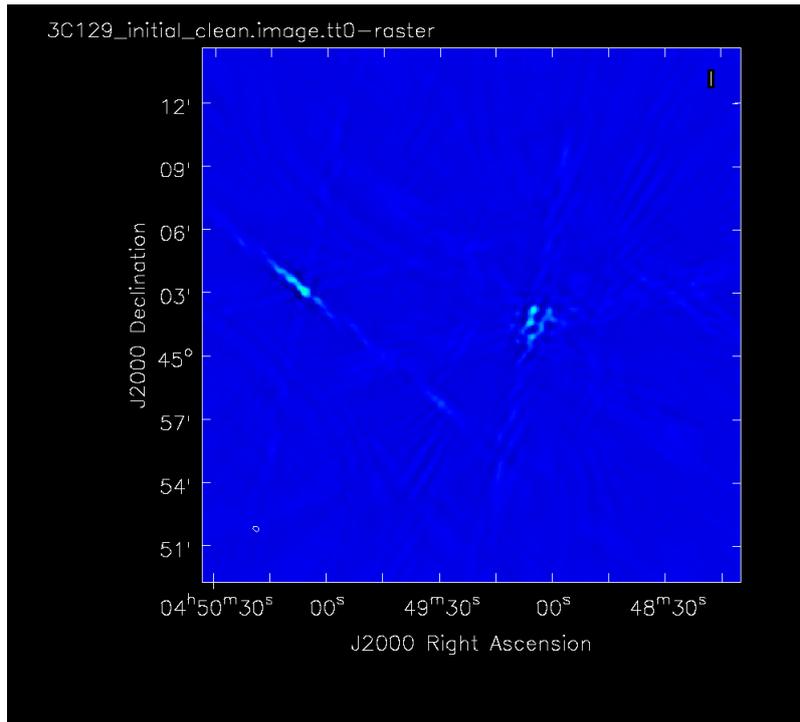


Figura 3.15: Ampliación para ver los dos jets del cuásar de la calibración de los datos astronómicos de 3C-129

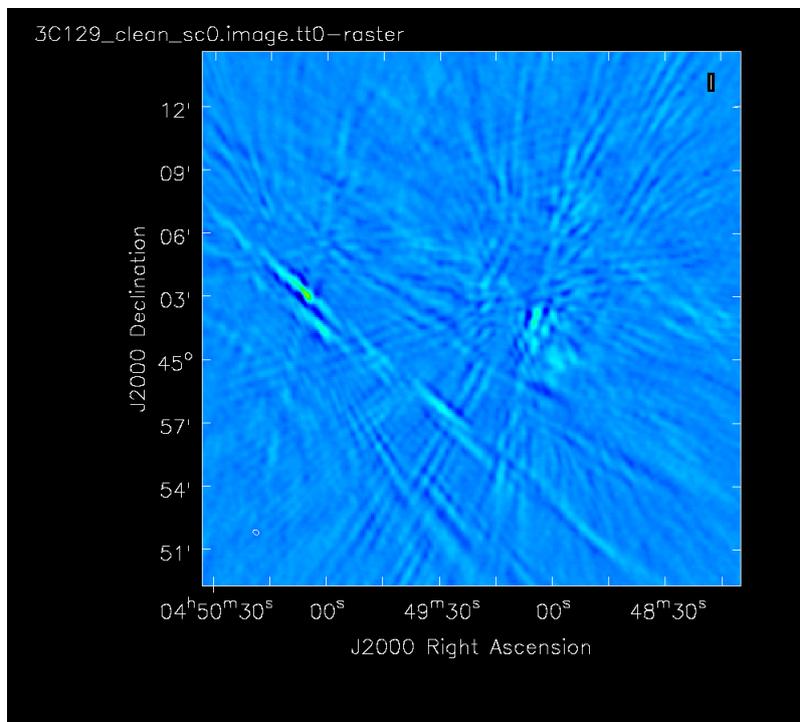


Figura 3.16: Ampliación para ver los dos jets del cuásar de 3C-129 cuando se contamina la señal con el TEC del Ecuador

Se puede ver la influencia y el impacto de los fenómenos ionosféricos en la observación y calibración de imágenes astronómicas. La imagen de la galaxia 3C-129, obtenida a través de una calibración precisa en el software NRAO CASA, muestra la mitigación de los retardos ionosféricos. Sin embargo, la segunda imagen, donde se incorporó una *contaminación* con el TEC del Ecuador a la calibración, se revela la interacción entre la ionosfera y la señal de un objeto celeste. Este contraste resalta la necesidad de abordar de manera integral un estudio de la ionosfera, particularmente del TEC y todos los ciclos y posibles causas que este pueda tener.

3.3. Conclusiones y recomendaciones

En este estudio, se realizó un análisis exhaustivo del comportamiento del contenido total de electrones (TEC) en tres estaciones ubicadas en el Ecuador: RIOP, TPEC y MAEC. A través de diversas metodologías, como análisis de tendencias, transformadas de Fourier y detección de máximos locales, se identificaron periodos característicos en las series temporales de TEC. Entre los hallazgos más relevantes se encuentran los periodos de 1 día, $17,203 \pm 4,888$ días y $167,196 \pm 35,3852$ días, que presentan variaciones los datos estudiados.

1. Para el caso del periodo de 1 día, este tiene su origen en la rotación terrestre y es el más evidente de los tres. A medida que la Tierra rota sobre su eje, las regiones de la ionosfera también experimentan cambios, principalmente ocasionados por la exposición al sol en el día. Mientras durante la noche, la ionización disminuye, lo que resulta en una disminución en el TEC.
2. Para el periodo de $17,203 \pm 4,888$ días, el análisis de su causa es muy complicado ya que pueden existir algunos fenómenos no previsibles que alteren estos resultados, hecho que se ve en su desviación estándar tan alta. Sin embargo, puede asociarse con las mareas atmosféricas inducidas o por la interacción de la atmósfera con

el océano que transmite humedad y calor a la atmósfera, mismo que experimenta cambios periódicos ocasionados por la luna. Estos cambios y efectos que tienen ciclos cortos pueden alterar la dinámica atmosférica y por ende el TEC.

3. El periodo de $167,196 \pm 35,3852$ días plantea una posibilidad de que esté relacionado con fenómenos climáticos a mayor escala. Este periodo coincide aproximadamente con medio año y podría estar influenciado por factores estacionales como la variabilidad en la radiación solar debido a los cambios en la inclinación de la Tierra en los meses de marzo y septiembre, así como con las corrientes frías y cálidas de la zona de inter convergencia tropical en los meses de enero y julio. De ahí se puede explicar el periodo y la desviación estándar de cerca de un mes.

Además, se logró llevar a cabo con éxito la calibración de datos astronómicos utilizando el software NRAO CASA mediante el procesamiento y corrección de señales, así como la simulación de observaciones celestes desde las ubicaciones ecuatoriales, se obtuvieron resultados cualitativos coherentes y precisos que contribuyen al entendimiento de la interacción entre las señales de los objetos celestes y la ionosfera.

Estos resultados enfatizan la importancia de considerar factores ionosféricos en la observación y análisis de datos astronómicos, así como en la interpretación de las variaciones del TEC. Este estudio ofrece una base para futuras investigaciones en el campo de la ionosfera y la astronomía, aportando información sobre la influencia de la ionosfera en las señales celestes.

Este trabajo contribuye al estudio de la ionosfera y la radio astronomía, al identificar periodos en la evolución temporal del TEC y al mostrar la influencia de este en las calibraciones en los datos astronómicos. Estos resultados están relacionados con la comprensión de los fenómenos ionosféricos y su influencia en las señales celestes, así como en la mejora de las técnicas de observación y análisis en la investigación espacial considerando la climatológica ionosférica y el TEC.

Referencias bibliográficas

- [1] Y. L. Alpert. *Radio wave propagation and the ionosphere*. Consultants Bureau New York, 1963.
- [2] A. Kleusberg G. Lachapelle R. Langley K. Schwarz J. Tranquilla P. Vanicek D. Wells, N. Beck and D. Delikaraoglou. *Guide to gps positioning*. Canadian GPS Assoc. Citeseer, 1987.
- [3] H. Barbier E. D. Lopez Izurieta, E. Toapanta Guamanarca. Ionospheric total electron content (tec) above ecuador. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022.
- [4] William Emery. *Remote Sensing Using Global Navigation Satellite System Signals of Opportunity*. Adriano Camps, in Introduction to Satellite Remote Sensing, 2017.
- [5] M. P. M. (Martin P. M.) Hall. *Radiowave propagation*. P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1989.
- [6] David Hathaway. The solar cycle. *Living Rev. Sol. Phys.*, 39:227, 09 2015.
- [7] J.M. Juan Zornoza J. Sanz Subirana and M. Hernández-Pajares. *Ionospheric Delay*. Technical University of Catalonia, Spain., 2011.
- [8] CASA Project Manager Jeff Kern. *CASA Synthesis Single Dish Reduction Reference Manual Cookbook*. 2017.
- [9] H. K. Jhuang, T. C. Tsai, L. C. Lee, and Y. Y. Ho. Ionospheric tidal waves observed from global ionosphere maps: Analysis of total electron content. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018.

- [10] Elliott D Kaplan and Christopher Hegarty. *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*. Artech house, 2017.
- [11] Michael C. Kelley. *The Earth's Ionosphere, Plasma Physics Electrodynamics*. Elsevier, 2009.
- [12] A. Komjathy. Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System. 2023.
- [13] M. Mendillo. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Reviews of Geophysics*, 44(4), 2006.
- [14] Hernán R Moreano. Interacción océano-atmósfera sobre la zona costera del ecuador. 1983.
- [15] M. Nishioka, S. Saito, C. Tao, D. Shiota, T. Tsugawa, and M. Ishii. Statistical analysis of ionospheric total electron content (TEC): long-term estimation of extreme TEC in Japan. *Earth, Planets and Space*, 2021.
- [16] RA Perley. Low-frequency radio maps of 3c129. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1977.
- [17] R. Creiger J. Freeman Jr R. Wolf R. Spiro R. V. Hilmer J. Shade T. Tascione, H. Kroehl and B. Hausman. *New ionospheric and magnetospheric specification models*. Radio Science, 1988.
- [18] E. G. Toapanta. Estimación del campo geomagnético ecuatorial a través del estudio del contenido total de electrones de la ionósfera. *Escuela Politécnica Nacional*, 2021.
- [19] B. Ubillus. Generación de un mapa del contenido total de electrones (tec) sobre ecuador. 2023.
- [20] Iain Webster et al. A regional model for the prediction of ionospheric delay for single frequency users of the global positioning system. 2023.